

FFI RAPPORT

SENSORTEKNOLOGI FOR FREMTIDIG UAV

STENSRUD, Rune

FFI/RAPPORT-2002/04167

FFIE/739/131

Godkjent
Kjeller 22. november 2002

Stian Løvold
Forskningsjef

SENSORTEKNOLOGI FOR FREMTIDIG UAV

STENSRUD, Rune

FFI/RAPPORT-2002/04167

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

P O BOX 25
 NO-2027 KJELLER, NORWAY
REPORT DOCUMENTATION PAGE

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT -2002/04167	2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED	3) NUMBER OF PAGES 65
1a) PROJECT REFERENCE FFIE/739/131	2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE -	
4) TITLE SENSORTEKNOLOGI FOR FREMTIDIG UAV (SENSOR ALTERNATIVES FOR FUTURE UAV)		
5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) STENSRUD, Rune		
6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig)		
7) INDEXING TERMS IN ENGLISH:		
a) <u>Electro optics</u>		IN NORWEGIAN:
b) <u>Forward looking infrared camera</u>		a) <u>Elektrooptisk avbildning</u>
c) <u>Synthetic aperture radar</u>		b) <u>Termisk avbildning</u>
d) <u>Unmanned Aerial Vehicle</u>		c) <u>Avbildende radar</u>
e) <u>UAV</u>		d) <u>Ubemannet luftfarkost</u>
		e) <u>UAV</u>
THESAURUS REFERENCE:		
8) ABSTRACT The document addresses the enabling technologies of sensor suite supporting UAV-procurement planning and UAV-system midlife update. According to image interpreters and analysts, an electro optical image is preferred. Provided that the UAV is operating below the sky, the electro optical imaging product received is likely to have very good resolution. To support 24-hour below the sky operations a forward-looking infrared sensor is essential. Electro optics and infrared sensors have limited visibility through clouds. In view of delivering images with better contrast (especially in hazy conditions), visible cameras could be replaced by near infrared cameras. Thermal imagers work fairly in adverse weather conditions and can penetrate moderate natural and manmade obscurants. A synthetic aperture radar (SAR) is considered to be a principal sensor technology. A SAR has day/night capability because it supplies its own illumination. A SAR has all-weather capability because radio waves propagate through clouds and rain with only limited attenuation. Drawback of the SAR is the heavy and sophisticated signal processing. Presently, most UAVs are using on ground SAR signal processing requiring a high information data rate for the down-link in order to send raw SAR data to the ground station. According to this, a high or medium altitude long endurance UAV with imaging radar (SAR), operating together with a low altitude UAV observing with electro optics and thermal sensors is tending to be an optimal solution. The future sensor suite would cover the multi-spectral range of VHF frequency to visible wavelength and the multi-dimensional parameters of contrast, two-dimensional shape, three-dimensional shape, temporal and polarization signatures of the target.		
9) DATE 22. November 2002	AUTHORIZED BY This page only Stian Løvold	POSITION Director of Research

ISBN-82-464-0662-0

UNCLASSIFIED

SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE
 (when data entered)

FORORD

Spesifikasjon av UAV-system for norsk anskaffelse krever teknologi-oversikt. Tilrettelegging for planlagt midtlivsoppdatering av UAV-systemet krever innsikt i fremtidens teknologiske muligheter. Dokumentet gir på sensorsiden grunnlag for anskaffelses-spesifikasjon og for planlagt midtlivsoppdatering.

FFI prosjekt 739, delprosjekt **teknologi**, har i perioden 1998-2002 arbeidet med kompetanseoppbyggende demonstrasjoner og testvirksomhet for å bidra på anskaffelsessiden med spesifikasjon og evaluering. Sensorarbeidet har i hovedsak vært innrettet mot høyhastighetsobservasjon i det optiske og infrarøde området. Arbeidet er materialisert gjennom prototyper og konsepter for innhenting av et rekognoseringsprodukt med en lavtflygende farkost. I første omgang en lavhastighetsforsøkplattform.

Dokumentet inngår i sluttdokumentasjonen til FFI prosjekt 739.

Inspirasjon og faglig støtte har undertegnede blant annet fått gjennom å følge forelesninger ved UNIK¹ i den aktuelle perioden. Takk til FFI-forsker Trygve Sparr, og FFI-forsker Erling M. Sunde, for fremragende formidlingsarbeid. Emnene som de respektive herrene underviser er radaravbildning og deteksjon av optisk og infrarød stråling.

Takk til Torbjørn Skauli og Ingebjørg Kåsen for flotte bidrag til spektralavbildningskapitlet.

Teksten er forsøkt gjort tilgjengelig for ikke-eksperter. Omfanget tatt i betraktning, skulle man under gjennomlesning føle at deler av teksten er utilgjengelig, så oppfordres leseren til å være selektiv. Kapittel 3.2 og 4, foruten innledning, oppsummering og konklusjon kan være en god begynnelse. Spesielt interesserte kan finne tekniske detaljer og spesifikasjoner ved hjelp av litteraturreferansene eller ved å studere appendiks.

¹ UNIK. Universitetet på Kjeller

INNHold

	Side	
1	INNLEDNING	9
2	OPPSUMMERING	11
3	ELEKTROOPTISKE SENSORER	12
3.1	Mot fremtidens elektrooptiske rekognoseringsprodukt	13
3.1.1	Fra våtfilm til digitale stillbilder	14
3.1.2	Sanntidshelbildefangst fra sensorplattform i høyhastighets-UAV	15
3.1.3	Nye sivile flybårne kamerasystemer	16
3.1.4	Stabilisert videoovervåking	19
3.2	Utviklingstrekk for elektrooptisk sensorteknologi	22
3.2.1	Fremtidens optikk	22
3.2.2	Spektrale avbildningsteknikker	22
3.2.3	Små kontraster i målet	24
4	TAKTISK LIDAR/LADAR OG TREDIMENSJONAL AVSTANDSMÅLING	28
5	PASSIV MILIMETERBØLGELENGDE SENSOR	29
6	AVBILDENDE RADAR (SAR)	31
6.1	SAR anvendelser	31
6.1.1	Lavfrekvent radiobåndbasert (VHF-) radar	31
6.1.2	Lavfrekvent radiobåndbasert (UHF-) radar	32
6.1.3	Mikrobølgebasert radar	32
6.1.4	Millimeterbølgebasert radar	34
7	TERMISK AVBILDNING	36
7.1	Termisk strålingsteori	36
7.2	Valg av bølgelengdeområde for termisk deteksjon	37
7.3	Kjølt detektorteknologi	39
7.3.1	Fotodeteksjon	39
7.3.2	Fra fotoledere til avalanche dioder.	39
7.3.3	Stirrende sensorer erstatter bevegelige komponenter	40
7.3.4	Fremtidig langbølget infrarød detektorteknologi	40
7.3.5	Fremtidig mellombølgeinfrarød detektorteknologi	41
7.4	Ukjølt detektorteknologi	41
7.5	Optiske systemer for termisk avbildning	43
7.5.1	Diffraksjon og romlig oppløsning	43
7.5.2	Optiske materialer	43
7.5.3	Anvendelser og eksempler	44
8	KONLUSJON	46

APPENDIKS	47
A.1 SAR prinsippet	47
A.1.1 Forbedret 'across track'-oppløsning, Δx , ved hjelp av SAR-prosessering.	48
A.1.2 Forbedret 'range'- oppløsning, Δr , ved hjelp av pulset frekvensmodulasjon(PFM)	49
A.1.3 LynxSAR parametere	50
A.2 Radar bånd	50
A.3 Geometrisk fortegning i SAR bilder	51
A.3.1 Avbildning av en vertikal stolpe ved hjelp av en sideseenderadar (SAR)	53
A.3.2 Avbildning av fjordarm ved hjelp av en sideseende radar (SAR)	54
A.4 Billedutsnitt, blenderverdier og lysstyrke	55
A.4.1 Beregning av billedutsnitt og synsfelt	55
A.4.2 Dimensjoneringseksempel for UAV- EO høyhastighetssensor	56
A.5 Hvem bruker, eller vil bruke, hva slags type nyttelast på hvilken UAV?	60
Litteratur	61
Fordelingsliste	65

SENSORTEKNOLOGI FOR FREMTIDIG UAV

1 INNLEDNING

'Forbedret nyttelast er nøkkelen til å vinne aksept for ubemannede luftfarkoster som et fullgodt supplement til – og med tiden, til utskifting av - bemannede plattformer', er overskrift og innledning til en artikkel i Jane's IDR, (19). Artikkelen beskriver aktiv og passiv sensorteknologi som kan egne seg for etterretning, overvåking og rekognoseringsoppgaver fra luften, (ISR²). Det vil si et bredt spekter av sensorer som kan inngå i en UAV-nyttelast, ref. (65).

Dokumentet nedenfor avgrenses til presentasjon av billeddannende sensorer. For funksjoner og komponenter relatert til kommunikasjon³, navigasjon og avionikk, vises det til dokumentlisten i sluttdokumentet (45) for FFI-prosjekt 739 UAV- analyse og teknologi, hvor disse emnene er grundig drøftet ref. (34), (35), (36), (37), (42) og (43). Mållokaliserende og hastighetsbedømmende akustiske sensorer og integrerte systemer for elektronisk krigføring⁴, se (46).

Fremtidens nyttelast vil med stor sikkerhet inneholde elektrooptiske systemer. Jo flere metoder for informasjonshenting, desto mer vet man om objektet som avbildes, og dess bedre kan man presentere informasjonen innhentet fra en flybåren sensorlast. Spektralinformasjon, som et fargebilde, gir tilleggsinformasjon. Termisk avbildning gir også økt informasjon. Vi kan konkludere med at fremtidens nyttelast vil få forbedret 'fargesyn' ved hjelp av høyoppløselig- og flerspektrale kamerasystemer samt termisk avbildning (FLIR⁵) og passive millimeterbølge (MMW)- sensorer. Med fremtidig avbildning som tema, er det uforvarlig å utelate aktive sensorsystemer som radar⁶systemer og lasere. Nedenfor presenteres laser for avstandsmåling og tredimensjonal avbildning (LIDAR⁷/LADAR⁸) samt SAR⁹- basert radarteologi.

Det går frem av analyser at fremtidens militære billeddannende sensorer i stor grad vil baseres på sivil¹⁰ teknologi (som halvlederbasert sensorteknologi, tynnfilm-detektorer, bolometere). Dette begrunnes i krav til lønnsomhet og volum hos utvikler og produsent, kombinert med

² ISR. Intelligence Surveillance Reconnaissance.

³ Kommunikasjon over transmittere, transpondere, emittere, forsterkere, stemme releer og telemetri.

⁴ Elektronisk krigføring som kraftige støygengeneratorer og effektive nærremål.

⁵ FLIR. Forward Looking Infrared. Stirrende termisk kamera, ikke nedoverseende og ikke linjebasert.

⁶ Radar er et akronym basert på frasen 'Radio Detection/Directing and Ranging'. Til radarsystemer, regnes flermodus-, invers-, bakkegjennomtrengende- og millimeterbølgeradaravbildning.

⁷ LIDAR er et akronym basert på frasen 'Light Detection/Directing And Ranging'. Aktiv laser basert sensor.

⁸ LADAR. Range-gated LASer imaging raDARs. Aktiv laser basert sensoravbildning. Komplementære med tradisjonelle radarer som følge av mulighetene til å bygge tredimensjonale bilder av utvalgte mål i sanntid med forbedret oppløsning fordi det opereres på optiske frekvenser.

⁹ SAR. Synthetic aperture radar. Radaroppløsning (på tvers av plattformhastighetsvektoren kalt asimut), forbedres ved redusert strålebredde. Antennens strålebredde reduseres ved økt antenneapertur (, eller ved å redusere bærebølgelengde). Antennestrålebredde reduseres, og asimutoppløsnings-cellen forbedres ved å øke antennens belysningsområde gjennom SAR-dataprosessering.

¹⁰ F&U-midler både i offentlig og privat regi.

forsvarsmarkedets behov for kosteffektive sensorprodukter. Dette gjelder for sensormarkedet. Noe annet gjelder for nybygging av plattformer, hvor vi fortsatt ser og vil se en tradisjonell forsvarsdrevet utviklingsinnsats med påfølgende tilpasning av produkter (som fly og helikopter), til det sivile markedet. Endrede rammebetingelser vil for nybygg av plattformer medføre økende grad av flernasjonalt militært samarbeid (DCI¹¹) ref. St.prp.45/pkt 5.5.2.

'Radiant Quartz', kort beskrevet i (10), er et nylig lansert USN¹²-forskningsprogram hvor eksperimentering med SAR-teknikker inngår. Aktiviteten har blant annet som oppgave å forbedre avbildende radarsystemer og algoritmer for lokalisering av mobile våpenplattformer. Innledende forsøk baseres på Lockheed-Martin-utviklet SAR-nyttelast, for deteksjon av trusler på tilstrekkelig rekkevidde.

En annen teknikk som studeres er hyperspektral avbildning som benyttes til å detektere kamuflerte eller skjulte mål. Hyperspektral- og flerspektralanalyse inngår som en aktivitet i TENCAP-programmet til USN som går under betegnelsen 'Radiant Argon', ref. (19).

General Atomic's LynxSAR kan anvendes til å sammenholde overlappende bilder, også kalt forandringsdeteksjon¹³, over tid, slik at menneskelig aktivitet som fotavtrykk og hjulspor kan avdekkes i vanskelig tilgjengelig terreng. Dette er en teknikk opprinnelig utviklet ved Sandia National Lab., som tillater at nyttig informasjon ekstraheres ut av to bilder tatt av samme område til ulik tid. Denne anvendelsen benytter eksisterende teknologi, og utfordrer tilgjengelig transmisjons- og signalbehandlingskapasitet.

I oktober 2001, etablerte US DoD et UAV-planprogram for blant annet å sikre fortsatt integrasjon av ubemannede farkoster i fremtidige nettverksbaserte stridsoperasjoner, ref. (19). Plangruppen består av ni arbeidsgrupper hvorav en er dedikert til sensorstudier. Hovedoppgaver for sensorarbeidsgruppen (sensommer 2002) er sensorstøtte for ISR¹⁴ og SEAD¹⁵. Trender for UAV-sensorer er migrasjon av video til høyoppløselig televisjonsstandarder sammen med presis og automatisert geografisk lokalisering, økt bruk av syntetisk apertureradar (SAR) og dynamisk mållokalisering fra luft til bakke (GMTI) samt en kombinasjon av langbølget avbildende radar og hyperspektral avbildning, ifølge samme kilde. Målet er å øke kvalitet og tilgjengelighet på innhentet sensorinformasjon under varierende værforhold med støtte for høy billedoppløsning og bredt billedfelt for deteksjon og identifisering av skjulte mål, ifølge (18), leder for gruppen.

Dokumentet vil forsøke å gi en innføring i billeddannende sensorteknologi, og presentere utviklingstrekk og virkemåte med utgangspunkt i anvendelse og bruk for militære flybårne plattformer. Fremtidsperspektivene vil bli presentert løpende under hvert teknologikapittel.

¹¹ DCI. Defence Capabilities Initiative.

¹² USN. United States Navy.

¹³ CCD. Coherent Change Detection. Forandringsdeteksjon vha. overlappende SAR-bilder.

¹⁴ ISR. Intelligence Surveillance and Reconnaissance.

¹⁵ SEAD. Suppression of Enemy Air Defences (of strike and counter-terrorism in this context).

2 OPPSUMMERING

Elektrooptiske systemer vil på kort sikt bli digitalisert. Våtfilm vil sakte avgå som lagrings- og opptaksmedium. Det sivile markedet er godt i gang med digitaliseringen. Eksisterende militære systemer for ubemannet og bemannet rekognosering, vil moderniseres etter hånden. I horisonten ser vi at elektronikken smelter sammen med utformingen av selve sensoren slik at bildet kan leses ut raskere og signalbehandles nær sensoren som spektrale avbildningsteknikker i flere dimensjoner. Da billedsensorene inneholder store datamengder, kreves billedkompresjon for å lagre og overføre data. Billedkoding blir derfor en integrert del av informasjonsbehandlingen. På mekanikkområdet¹⁶ medfører nanoteknologi at svært små 'mekaniske' maskiner kan konstrueres. Området for disse kalles mikroelektriske mekaniske system, MEMS, og kommer til å spille en vesentlig rolle i fremtidens optikk.

Flybåren laserteknologi - taktisk LIDAR og tredimensjonal avstandsmåling - vil være kommersielt tilgjengelig før tiåret er omme. Utviklingen er omfattende og gjelder både sivile og militære¹⁷ nyvinninger. Fremtidens laser kommer til å generere en tredimensjonal sanntidsvideo. Kombinert med elektrooptiske sensorer vil dette kunne realiseres ved å belyse fra laser (vha. nanosekundpulser) og fremstille bilder med centimeters avstandsoppløsning. Utviklingsmiljøer arbeider i dag med tredimensjonale fokalplandetektorer med tusenvis av billedpunkter for blant annet dette formålet.

Passive millimeterbølgesensorer er en relativ umoden teknologi. I en fremtidig tidshorisont på ti år vil vi med stor sannsynlighet ha distribuerte synsfelt bestående av mange romlige aperturer til å sørge for et effektivt synsfelt¹⁸.

Lette avbildende radarsystemer (SAR, 50 kg) med nær sanntidsavbildning er i prinsippet til salgs i dag. Systemene har begrenset rekkevidde (5-25km), men ekstremt god oppløsning (desimeter). Den senere tids utvikling av SAR-prosesseringssteknikker og algoritmer for bevegelseskompensasjon parallelt med økt tilgang på regnekraft og lagringskapasitet, har gjort dette mulig. Kravene til regnekraft for SAR-anvendelser er fortsatt høye, men reduksjon i volum og vekt tillater at neste generasjon kan realiseres i mindre og mer effektive plattformer.

Utviklingen av stirrende sensorer i infrarødbølgeområdet går sin gang, noe som resulterer i større array kombinert med økende følsomhet. Militær¹⁹ målsetting er å realisere avbildende utstyr med termisk deteksjon i flere fargebånd, med høy ytelse og stirrende detektorer med kompakt optikk. Mellombølgeinfrarøde detektorer skal brukes til identifikasjon på lang avstand, og langbølgeinfrarøde detektorer er ment for raskt søk og sikt gjennom støv og røyk. Dette er avbildende systemer med flerfunksjonsdetektorer for avbildning i to eller flere farger, og baserer seg på FPA²⁰ med avalanche fotodioder, store array (1000x1000) og økt fokalplansignalprosessering, teknologi som er demonstrert, men som ikke er hyllevare.

¹⁶ Det er en glidende overgang mellom nano og MEMS. Nanoteknologi forstås mer å være på skala av enkeltatomer, mens MEMS er yttergrensen for vanlig mekanikk laget med "dreibenker og fresemaskiner".

¹⁷ IR-laser teknologiutvikling er militærdrevet.

¹⁸ Med effektivt synsfelt menes den effektive inngangsaperturen til MMW-systemet.

¹⁹ Avansert IR-FPA teknologiutvikling er militærdrevet.

²⁰ FPA. Focal Plan Array.

Den teknologiske utviklingen gjør det mulig å realisere bildedannende optiske systemer med meget høy spektral oppløsning i både det synlige og infrarøde spektralområdet. Slike systemer vil kunne gi betydelig økt sannsynlighet for deteksjon, gjenkjenning og identifikasjon av lavsignatur mål og av kamuflerte mål, bedre diskriminering mot narremål, og betydelig redusert falsk alarm rate, sammenliknet med konvensjonelle systemer. Det er en betydelig utfordring å realisere denne type systemer og å prosessere den store mengde data som genereres i sann tid.

3 ELEKTROOPTISKE SENSORER

Et tradisjonelt speilreflekskamera (eller rammekamera) er basert på å samle lys ved hjelp av et objektiv (bestående av en eller flere linser), og fotokjemiske prosesser, (som våtfilm). Moderne TV- og videokameraer benytter i prinsippet den samme optikken, men er basert på elektronisk CCD²¹- detektorteknologi. Det hevdes at for høyoppløselig avbildning er det lite som kan konkurrere med analogfilm, noe vi drøfter nedenfor.

Fremtidens elektrooptiske rekognoseringsprodukt er sannsynligvis et todimensjonalt bilde som i dag. Men den passive optiske sensoren er ikke like passiv lenger. I stedet for bare å registrere et todimensjonalt bilde, er fremtidens optiske sensor også en signalbehandler. Det handler om mer informasjon enn bare et bilde. Fremveksten av ny 'optronik', kombinasjonen av avansert optikk og elektronikk, gjør at man kan lagre data i mange dimensjoner som siden vises som bilder med forsterkede egenskaper. Med egenskaper menes blant annet vinkelinformasjon (dvs. romlig vinkeloppløsning i form av et klassisk todimensjonalt sorthvitbilde), spektralinformasjon (et fargebilde), radiometrisk intensitet (dvs. målt varmestråling), polarisasjon (reflekser) og bevegelse²².

I det nære tidsperspektivet ser vi på flybårne elektrooptiske rekognoseringsprodukter og overgangen fra våtfilm til digital helbildefangst.

Ønskes ytterligere fordypning se kildehenvisning (3).

²¹ CCD. Charge-Coupled Device. Konverterer fotonladning til analoge spenningspulser. Utlekningskrets. Sentral komponent i billedannende sensorer.

²² Temporærbevegelse i betydningen tidsoppløst informasjon. Objekter som beveger seg i forhold til bakgrunnen, type hurtige forandringer (som kan detekteres vha. 'moving target indication' -teknikker). Temporær informasjon kan også være forandringer som følge av plattformforflytninger og feltarbeid på installasjoner. Eller som naturlig følge av værforandringer og døgn- og årstidsvariasjoner. Type sakte forandringer (som kan detekteres vha. endringsdeteksjon). NB! Ordet temporær må ikke forveksles med 'midlertidig' (temporal/temporary).

3.1 Mot fremtidens elektrooptiske rekognoseringsprodukt

Dokumentets hovedanliggende er å se på fremtidens billeddannende sensorer i ubemannede flybårne anvendelser for militært bruk. Reduserte bevilgninger til forsvarsmateriell og generell nedrustning har gjort at det profesjonelle sensormarkedet i stor grad er giret for sivile anvendelser. En stor del av utviklingen innenfor elektrooptikk er sivilt drevet, og det er nødvendig å se hva som skjer i disse markedene, for å kunne si noe håndfast om hva som er tilgjengelig for militær elektrooptiskovervåkning.

Det er noen unntak fra den generelle trenden at EO-utvikling er sivilt drevet. Avanserte IR-FPA er ett av disse, IR-laserkilder er et annet. Se kapittel (7.3.2) og (4).

Elektronisk nyhetsfangst og luftbåren trafikkovervåking tilpasset helikopterplattformer er et volummarked for stabilisert videoovervåkningsutstyr. Dette er produktserier som også passer for ubemannede militære plattformer. Stillbildeproduksjon for vertikal flyfotografering er et annet tilgrensende sivilt marked for elektrooptikk i ubemannede farkoster.

Kapitlet nedenfor beskriver den pågående digitaliseringen av elektrooptiske systemer i flyfotobransjen og presenterer siste nytt innenfor stabiliserte kameraplattformer. Vi ser i hvilken grad dette påvirker elektrooptikk tilgjengelig for høyhastighetsfotografering og 'live video' i ubemannede farkoster.

3.1.1 Fra våtfilm til digitale stillbilder

Til rekognosering med høyhastighets UAV-plattformer (som CL-289 eller Mirach 100/5), har vertikalopptak med tradisjonelle våtfilmkameraer (som for eksempel Zeiss KRB 8/24), vært enerådende (på 80- og 90-tallet²³). Et våtfilmkamera har relativt høy egenvekt (typisk 20kg for komprimerte rammekamera), og blir utsatt for store fysiske påkjenninger under flygning. Sluttproduktet fra rekognoseringskameraer som våtfilmfotograferer i lav- og medium høyde, er serier med overlappende bilder (gjerne 9toms bilder i negativformat, 23x23cm). Ved riktig håndtering har moderne flyfilm svært gode egenskaper, men variasjoner opptrer. For det første har hver filmtype begrenset spektral sensitivitet, slik at vi må velge film etter hva slags data vi ønsker å observere. For det andre vil filmens ytelse avta med stigende flyhøyde og økende dis. Når kameraet projiserer terrenget gjennom ett enkelt objektiv, kalt sentralprojeksjon, vil objekter i bildekanten gi inntrykk av å lene seg vekk fra bildesenteret. Denne radielle forskyvningen reduserer innsynet i landskaper med oppstikkende objekter, som skog og husbebyggelse.

Menneskets øye er sensitivt for lys i bølgeområdet 380-780 nm, som vi kaller optisk område av det elektromagnetiske spektrumet. Øyet er mest sensitivt i det grønne bølgeområdet, rundt 550 nm. I likhet med øyet, registrerer filmen flere overlappende bølgeområder samtidig. Denne radiometriske overlappen setter begrensninger for hva en kan bruke filmen til, ettersom en ikke uten videre kan analysere et bestemt fargeområde uten påvirkning fra de øvrige. Filmens fargeegenskaper varierer dessuten mellom produksjonsserier, over tid, og med hvordan filmen håndteres i produksjonsprosessen. Fototyding og analyse av billedproduktet foregår i dag i hovedsak på billedskjermer tilknyttet kraftige arbeidsstasjoner. Filmene gjøres tilgjengelig for billedtolkeren ved fotokjemisk fremkalling og digitaliseres ved hjelp av høyoppløselig skanning.

Vi henter frem et talleksempel for å vise hvilken romlig oppløsning som gjelder for henholdsvis moderne flyfilm- og for elektrooptiske kamera. Et typisk rekognoseringsfotografi inneholder 10^8 -piksel hvor hvert bildeelement eller korn tilsvarer cirka 6bit gråtoner, ifølge (11). Tar man 5bilder/sekund med 6bit oppløsning får man en informasjonsmengde i en monokromatisk filmeksponering som tilsvarer $5\text{bilder/sekund} \times 10^8\text{piksel/bilde} \times 6\text{bit/piksel} = 3\text{Gbit/sekund}$, en anelig størrelse, som gir mening etter digitalisering av negativfilmen. Ett stillbilde fra en høyoppløselig elektrooptisk flersensor vil inneholde cirka $10^7\text{piksel/helbilde}$ (4sensorer x 4k vertikalpiksel x 7k horisontalpiksel per helbilde), med dagens CCD²⁴-teknologi. I dette eksemplet har våtfilm fortsatt et vesentlig informasjonsmessig overtak. Fotokjemisk eksponering er cirka faktor 10ganger bedre enn elektrooptisk med hensyn på romlig oppløsning.

Digital eksponering gir mange fordeler sammenlignet med film, ref.(8) og (9). Digitalisering av dagens luftbårne våtfilmkamera vil sannsynligvis kunne gi store kosteffektive gevinster i operasjoner med høyhastighets plattformer. Penger blir spart som følge av at man ikke har film, ingen fotolaboratorier og mer automasjon. Tid blir spart som følge av færre avbrudd i produksjons-prosessen og ingen skanning. Videre vil ny teknologi gi tilgang på nye anvendelser

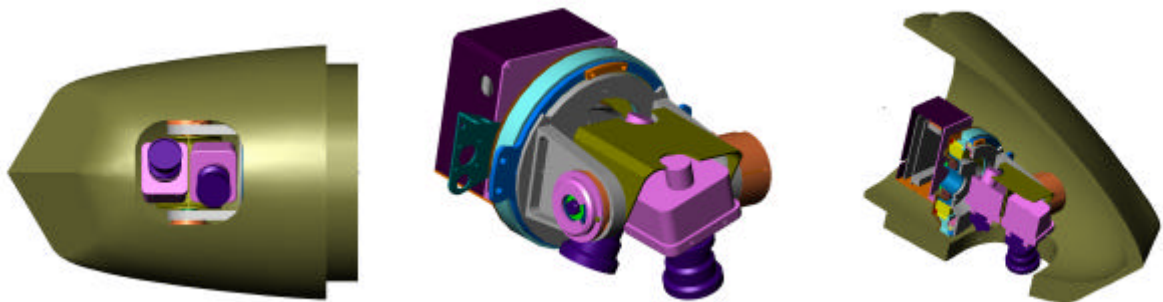
²³ Det fantes prototyper av høyhastighets -UAV som innhentet elektronisk bildefangst på midten av 90-tallet, men UAV 'Advanced Tactical Airborne Reconnaissance System' -nyttelasten i BQM-145A var ikke hylleware dengang. Northrop Grumman BQM-145A medium-rekkevidde- høyhastighets -UAV- programmet ble terminert 1991. 6 jetdrevne UAV ble fløyet 1997. Markedsføres fortsatt som en jetdrevne drone som kan sørge for høyoppløselig EO-bilder.

²⁴ Philips 7k x 4k CCD.

som flerspektralanalyse og sanntids radiolinkoverføring av høyoppløselige stillbilder. Kort sagt blir det kvikkere resultater i løpet av kortere tid. Kravet til et digitalt kamera må selvsagt være at kvaliteten på rekognoseringsproduktet er godt nok for billedtolkeren. Tekniske krav omfatter blant annet spektralfargeoppløsning, spektralnøyaktighet (som fargegjengivelse), romlig nøyaktighet og romlig oppløsning samt 'in-flight' billedkontroll. Av disse er det kun på romlig oppløsning som det elektrooptiske kameraet ikke kan møte et våtfilmkamera med dagens CCD-teknologi.

3.1.2 Sanntidshelbildefangst fra sensorplattform i høyhastighets-UAV

Høyhastighetssensoren presentert i Figur 3.1, skal kunne nyttes i sanntidsmodus ved testfyring som demonstrator. 'Live video' vil bli overført på digital transmisjonslink til bakkestasjon som vist i Figur 3.2. Link kapasiteten antas å være 4-5 megabit/sekund slik at kompresjon av billedformatet vil være nødvendig. Sensorplattformen antas å ha nok billedlagringskapasitet til å kunne håndtere cirka 10 minutter rådata av inntil 2- til 30 megapixel helbilder i sekundet. Bakkestasjonen vil være en klient/serverbasert løsning, ref.(36). Signalbehandlingen utføres på serveren, mens oppsett av systemet og presentasjon av 'live video' gjøres hos klienten. 'Live video'- og 'still video'-produkter vil være tilgjengelig fra sensorplattformen. 'Live video' vil i alle tilfeller bli avspilt med redusert hastighet sml. opptakshastigheten. Det er mulig for flere klienter å ha tilgang til systemet. Applikasjonsprogramvaren må være utformet på en slik måte at det er enkelt å forflytte seg i arkivet. 'Singel step'-modus må være tilgjengelig med mulighet for å forflytte seg mellom enkelteksponeringer i rekognoseringsproduktet. Kommunikasjon mellom server og klienten skjer via Ethernet, ref. (34). Systemløsningen skal kunne støtte billedtolkning og avspilling etter landing. Avspilling av lagret informasjon til portabelt medium må kunne gjøres umiddelbart etter landing. Konseptet er skissert i Figur 3.2.

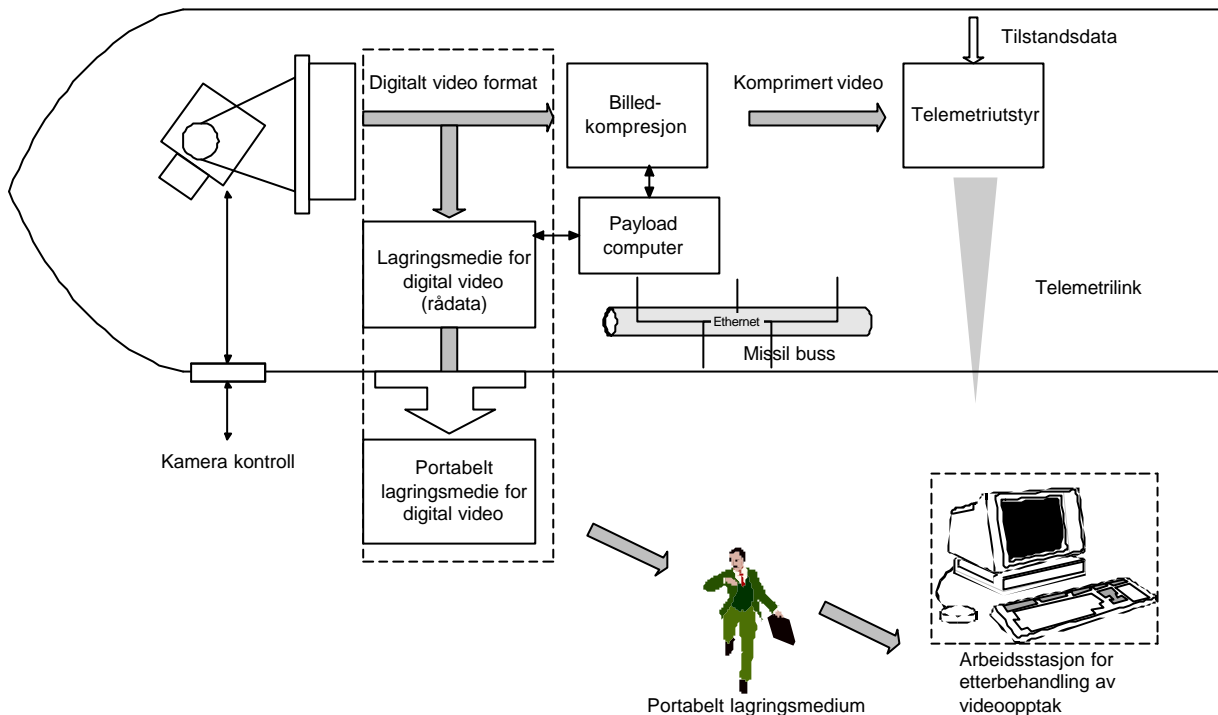


Figur 3.1 Viser eksempel på en elektrooptisk høyhastighetssensor²⁵. Konseptet baserer seg på mekanisk stabilisering og elektrooptisk helbildefangst. Både nedoverseende og framoverseende løsninger er foreslått i forbindelse med FFI UAV-prosjektet (år 2000). Valg av synsfelt og sensorelevasjonsvinkler se (38), (41) og (62).

Ønsker man å øke monokromsignaloppløsningen for sensorplattformen i Figur 3.1 til 12-, 14- eller 16- bit per piksel, er dette selvsagt mulig. Utfordringen vil blant annet bestå i å modifisere eller realisere kameraløsninger som passer inn i en 8'-toms stabilisert plattform. Ønsker man å bytte til en sensor med 8-bits digital fargeutgang kreves større lagringsplass for hvert piksel (3x8

²⁵ Kodak Megaplus ES 1,0/TH Theteread Head digitalt sorthvitt helbildekamera har 8 bits digital monokrom utgang (10 bits intern oppløsning). Geometrisk er kameraet utformet i to separate deler. Sensorhodet er bygget rundt en 1Kx1K-sensor med progressiv utlesning (helbilder). Det dynamiske området for kameramodellen er oppgitt til 48 dB, $20\log_{10}(S/N)=48$ dB gir et dynamisk område som tilsvarer $2^{(x-1)}=SN$, $x=\log_2(S/N)+1=7.9726+1$ bit. Kodak Megaplus ES 1,0/TH er blant annet brukt under uttesting av moduler i samband med International Space Station (ISS) prosjektet.

bit=24bit) for å beholde samme romlige oppløsning, (3xCCD). Formelverk for beregning av billedutsnitt og synsfelt se appendiks (A.4.1). Dimensjonering av optikk for sensorpakken se appendiks (A.4.2).



Figur 3.2. Viser skisse av sanntidshelbildefangst fra sensor i høyhastighets-UAV.

3.1.3 Nye sivile flybårne kamerasystemer

Det er i den siste tiden kommet komplette digitale bildedannende flybårne kamerasystemer for sivil bruk, (ADS40²⁶ og DMC²⁷). Testflygning for skandinaviske kunder gjennomføres i løpet av 2003 i henhold til (7). Selv om disse sensorsystemene primært er konstruert for kartleggingsformål og kun kan benyttes ved lave hastigheter (150 m/s), er de ferdigutviklede elektrooptiske grunnmodulene også anvendelige for høyhastighets formål (>300 m/s). Systemene som tilbys er konseptuelt forskjellige, og tilbyr ulik sensorkonfigurasjon. Fellesnevneren er imidlertid at sensorene registrerer innfallende lys ved hjelp av høyoppløselige CCD - brikker med kjent pikselgeometri. Etter fotografering blir bildepikslene normalisert, og montert sammen til virtuelle bilder slik vi er vant til å tolke dem. Det skilles mellom matriseskannere, som registrerer helbilder over store CCD-flater kalt helbildefangst, og lineære skannere, som avbilder terrenget linje for linje.

Helbildematriseskannerens styrke ligger i intuitive bilder, og kompatibilitet mot eksisterende systemer (det vil si kartfotobransjens eksisterende rammekamera). Det er i prinsippet ikke nødvendig med avanserte posisjons- og orienteringsdata (DGPS²⁸/INS²⁹) for å kunne gjengi

²⁶ ADS40 (Airborne Digital Sensor) fra LH-Systems (Leica-Helava) i samarbeid med DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

²⁷ DMC (Digital Modular Camera) fra Z/I Imaging, en joint venture mellom Carl Zeiss og Intergraph.

²⁸ DGPS. Differential Global Positioning System.

²⁹ INS. Inertial Navigation System.

terrenget korrekt. Helbildematriseskannere er derimot sårbare for CCD-produksjonsutbyttet (yield) i form av pikselfeil på de utvalgte brikkene. Interpolering er nødvendig der brikkene genererer tomme piksler. Ettersom det verken er teknologisk eller økonomisk mulig å erstatte dagens flyfilm med CCD-brikker i 23x23cm-format, blir helbildematriseskannere bygget opp av flere kameraer som synkroniseres for å produsere virtuelle enkeltbilder. Fullt utbygget kan et slikt system bestå av opptil fire høyoppløselige pankromatiske og fire flerspektrale sensorer for henholdsvis sorthvitt og fargefoto³⁰. Dette stiller åpenbare presisjonsmessige krav til utstyret. Spesielt ved bruk i luftfarkoster med høy hastighet. Pankromatisk helbilde er vist nedenfor i Figur 3.3.

'Push broom' - skannerens³¹ styrke ligger i forbedret terrenginnsyn og mulighet for integrert produksjon av ferdig geografisk refererte terrengmodeller. Slike systemer³² leverer dessuten høyoppløselige fargebilder uten radiometrisk overlapp, en vesentlig fordel i forhold til analogfilm ved tematisk bildeanalyse. Bildefilene er imidlertid kontinuerlige, og må håndteres spesielt før import til bildetolkningsapplikasjonen. Den integrerte bruken av posisjons- og orienteringsdata genererer store datamengder, som det må tas høyde for i produksjonsprosessen. Historisk har linjebaserte kamera vært et preferert valg i bemannede plattformod'er³³ under militære rekognoseringsoppdrag. Begrenset lagringskapasitet³⁴ og ekstreme krav til skannerater (1800linjer/sekund)³⁵ har vært noe av grunnen til dette valget. Men med lysfølsomheten og utlesningshastigheten til dagens CCD-sensorer er forutsetningene for helbildefangst betydelig forbedret. Dynamisk datakompresjon er annet stikkord som muliggjør helbildefangst med stort dekningsområde.

Komprimerte datarater på 20-200megabyte/sekund krever for et timeopptak, 50-500gigabyte komprimert lagringsplass. Vi antar at 50ganger kompresjon ikke vil korrumpere billedata. Dette gir oss følgende regnestykke; 5 bilder/sekund x 10⁸piksel/EOhelbilde x 12bit/piksel x 1/50 = 6Gbit /sekundx0.02 = 120 megabyte/sekund datarate for den komprimerte billedstrømmen

Mens kartografiske billedsystemer vektlegger metrisk målenøyaktighet, er detaljoppløsning (med minimum 75 linjepar/millimeter elektrooptisk oppløsning), og rask helbildehastighet (tilsvarende billedrater på 4-10 Hz), sentrale krav for rekognoseringsystemene. Et typisk eksempel på en basissensor i et modulbasert helbildekamera til bruk i en høyhastighetsplattform, vil være en CCD-sensor (7kx4k) (12 eller 16 µm pitch³⁶), det vil si 7000 billedpunkter til tversgående bakkedekning, (6), hvor fokalplan bredden (7k x 16µm = 11,2 cm) og fokalhøyden tilsvarer et areal som er cirka 1/4 av en 9-toms film. Man kombinerer fire kamera for å oppnå full dekning av scenen. Vi antar 1000 fot høyde, 1000 meter dekning, 60°/2.0 FOV³⁷ /f# per enhetssensor. Forklaring til begrepene synsfelt (FOV), f-tallet (for maksimal blenderåpning) og fokallengde se appendiks (A.4).

³⁰ DMC fullt utbygget, består av 4 pankromatiske sensorer med totalt 13.500x8000 piksler, og 4 multispektrale, med 3000x2000 piksler, som er plassert i rekke mellom de pankromatiske.

³¹ 'Push broom' – en sammenstilling av ordene fremdrift(push) og feiekost(broom). Henspiller på bildeoppbygging linje for linje. 'Water fall' bildevisning.

³² ADS40 består av 3 pankromatiske og 4 multispektrale sensorer. Hver sensor er bygget opp av to lineære brikker, hver på 12.000 piksler, som er montert skrått i forhold til hverandre med ½ piksels forskyvning (3,5µ).

³³ Pod vil i denne sammenhengen være en beholder med kamerautstyr integrert til en luftfarkost.

³⁴ Militær linjebasert rekognosering uten integrerte posisjons- og orienteringsdata.

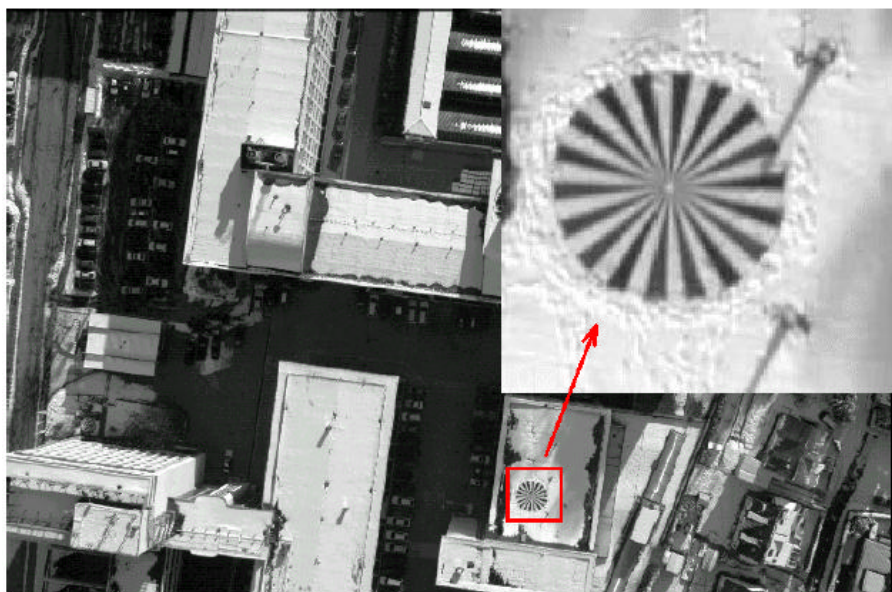
³⁵ W.Vinten Ltd (UK) Vicon 18 POD Type 8010 EO push broom sensor.

³⁶ Pitch. Piksel-til-piksel avstand.

³⁷ FOV. Field Of View. Synsfeltsberegninger se appendiks (A.4).

Kombinasjoner av flere sensorer krever plass, men med noe volumreduksjon av tilgjengelig singel sensorteknologi vil et flerhodekamera kunne innpasses i et begrenset UAV-tverrsnitt. Det fordelaktige med CCD-helbildefangst er at geometrien i scenen fryses i en eksponering og med FMC³⁸, bildevandringskompensasjon, står man relativt fritt til å velge eksponeringstid relativt til lysforholdene i scenen og til hastighet- /høydeforholdet for plattformen. Med et linjebasert kamera vil man ha behov for individuell kalibrering av pikselposisjoner. CCD-matriser for helbildefangst produseres i dag med svært høy optisk presisjon³⁹. CCD-sensoren ovenfor har 10-12 bit signaloppløsning⁴⁰, mens med signal til støy forholdet for film (900 til 1000 ASA), blir tilsvarende oppløsning, 6-8 bit. CCD-sensoren har overlegen signaloppløsning og kan levere romlig oppløsning på 75 linje par/millimeter. (Normalt fungerende syn kan skille på cirka 7 til 10 linjepar/millimeter). Billedtolkeren har derfor anledning til å zoome og forstørre det digitale billedproduktet i noe mindre grad enn hva som er mulig med våtfilmproduktet. (100linjepar/millimeter eller bedre). Men kontrasten er betydelig forbedret for det elektrooptiske sammenlignet med det fotokjemiske produktet, se Figur 3.4 og Figur 3.5.

Fullskala uttesting av digitale billedannende sensorer pågår for fullt i kartmiljøene⁴¹. Våtfilmkamasystemene vil gå noen år til i de franske og tyske UAV-batteriene (CL289), men vil sannsynligvis bli oppgradert innen de neste 5 årene⁴² (som følge av kosteffektivisering ifbm midtlivsoppdatering). Oppgraderinger vil ikke være på plass noe særlig raskere som følge av at sensorprodusentene er innrettet mot det sivile markedet, ifølge (5), og som følge av offentlige bevilgninger. I løpet av denne tiden vil neste generasjon sivile elektrooptiske nøkkelkomponenter for militær medium - og lavhøyderkognosering, være tilgjengelig.



Figur 3.3. Zeiss Intergraph DMC kameraprototype fløyet over Oberkochen 25/1/2000. Høyoppløselig digitalt helbilde eksponert ved hjelp av fire pankromatiske sensorer med sentralisert lukkermekanisme og billedvandringskompensasjon, (FMC). Plattformhastighet, 70m/s. Minste bildeelement, GSD=5 cm (1,97"). (Luftfoto: Terra Bildmessflug.)

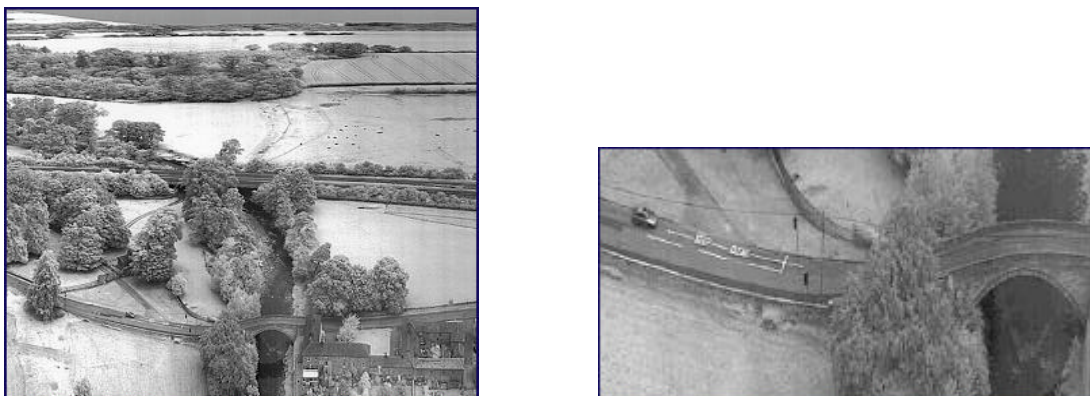
³⁸ FMC. Forward Moving (target) Compensation. Bildevandringskompensasjon.

³⁹ CCD-litografi og stikkteknikker gir nøyaktighet bedre enn 100nm referanser til pikselcellene på CCD brikken.

⁴⁰ Med signaloppløsning menes spektral informasjonen i hvert bildepunkt.

⁴¹ Fjellanger Widerøe GEO AS (Norge) og Metria (Sverige) tester ADS40 og DMC høsten 2002/våren 2003.

⁴² Briefing ved Dr. Hinz/O. Zenke fra Z/I, 19-03-02 vedr. CL289 sensoroppgradering og UAV sensorer.



Figur 3.4. Viser et type EO 8010-elektrooptisk bilde bygget linje for linje. Bildet er tatt fra jagerfly under et rekognoseringsstokt over et engelsk landskap. (Gjengitt med tillatelse av W. Vinten Ltd.)

Eksponeeringene i Figur 3.4 og Figur 3.5 viser bilder tatt fra et jagerfly under et rekognoserings-/kamerateststokt over et engelsk landskap. Bildene bekrefter antakelsen om at det elektrooptiske produktet har bedre kontrast enn våtfilmen⁴³. Figur 3.3 viser resultater fra nyutviklet flersensor-teknologi for digitalhelbildefangst.



Figur 3.5 Viser et type F95 våtfilmkamerabilde. Bildet er tatt fra jagerfly under et rekognoseringsstokt over et engelsk landskap. (Gjengitt med tillatelse av W. Vinten Ltd.⁴⁴)

3.1.4 Stabilisert videoovervåking

Tilbydere av flybåren stabilisert videoovervåking henvender seg til flere markedssegmenter. Det som sorterer under – (1), offentlig overvåking og militær etterretning, - (2), kommersielle virksomheter og (3), nyhetsfangst, film- og underholdning. Markedsfordelingen er cirka 60%,(1) og 40%,(2)+(3). Typisk enhetspris for et system for helikopterbaserte billedopptak (16 tommers stabilisert sensor med video/termisk/laser), er fra 600.000 US\$ og oppover. 12- og 14tommer

⁴³ Våtfilmbildet i Figur 3.5 kan minne om et IR-bilde, lys asfalt (varm stråler) og mørk vegetasjon (mindre varm stråler). Vi antar at våtfilmen som er benyttet under opptakene summerer større andeler av det nærinfrarøde spektrumet sml. EO bildet.

⁴⁴ Vist under et seminar med Thales Electro Optics repr. Karl Thompson (tidl W Vinten Ltd) (06-02-02).

stabiliserte sensorpakker tilbys for UAV-markedet fra 250.000 US\$. Det vil si en betydelig del av enhetsprisen til en Pioneer. I henhold til tall oppgitt i (33), korrigert for prisstigning, vil sensorandelen utgjøre tilnærmet halve Pioneer-enhetsprisen. Det totale globale UAV-markedet ble stipulert til å doble fra 2 milliarder US\$ til 4 i perioden 1997-2004⁴⁵. Vi ser i dag at disse anslagene var noe optimistiske, men på sikt vil ikke ubetydelige beløp av omsatte UAV-midler, tilfalle sensorprodusentene.

Hylsteret til stabiliserte overvåkningssensorer (turret) tilbys i flere størrelser (der 12, 14, 16 og 20 tommer skulle dekke de fleste behov). Sensorplattformene tilbys med mekanisk grov- og finstabilisering⁴⁶. Det elektrooptiske systemet støtter både bredt synsfelt for overvåkning og smalt for identifisering. Stabilisert videoovervåkingsutstyr er utviklet for relativt saktegående plattformer, både roterende og fastvingefarkoster. (Begrenset oppad til cirka 340 knots). Nattpasitet og overvåking under varierende værforhold er sørget for av lysfølsomme dagslyskamera og termisk stirrende kamera. Typisk konfigurasjon består av vidvinkelkamera med 40° til 2° kontinuerlig synsvinkel, teleskopkamera med 0,6° til 0,1° trinnvist billedutsnitt, og termisk (mellombølgeinfrarødt) stirrende kamera med trinnvis 30° til 1° billedutsnitt samt lasersøkende avstandsmåler (inntil 30 km ved normale siktforhold). Auto og sektor skann- og følgefunksjoner for å kunne peke på en geografisk lokasjon og/eller identifisere et bevegelig objekt, er vanlig både i bemannede og ubemannede farkoster (hvor de opereres over telemetri, up-link, eller er forhåndsprogrammert). Videoovervåking kan integreres med radarsystemer på en slik måte at elektrooptikken automatisk søker på utvalgte radarmål. Stabilisert videoovervåkingsutstyr har normalt en integrert gyro- og treghetssensorbasert navigasjonspakke (INS) slik at hele enheten skal kunne opereres uavhengig av de plattformbaserte systemene og være flyttbar. Digitaliserte grensesnitt for video tilbys som opsjon til analoge. (PAL/CCIR er analogt standard utgangsgrensesnitt i europeiske systemer).

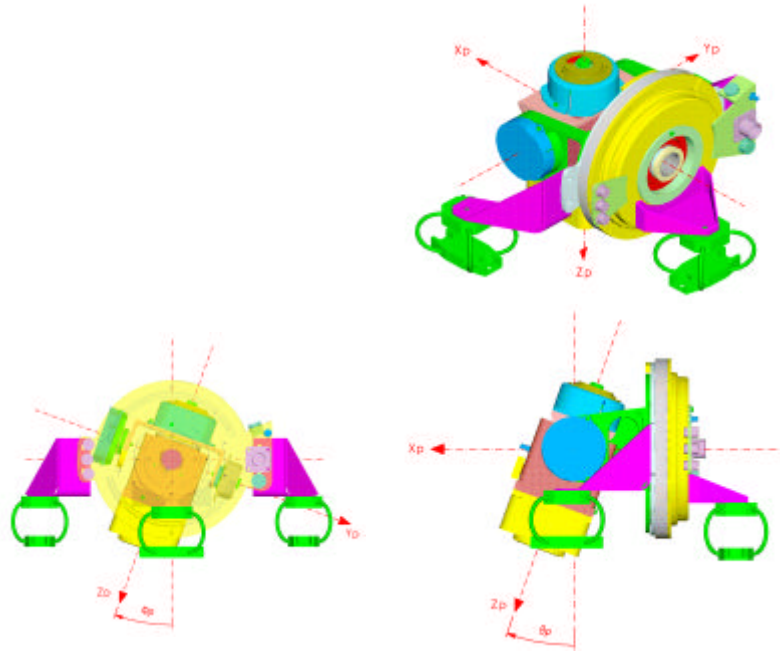
Aktører innenfor stabilisert luftbåren overvåkning venter seg et fortsatt moderat økende salg⁴⁷ i årene som kommer, også innenfor UAV-segmentet.

Sensorstabilisering, se Figur 3.6 nedenfor. Her vises et enkelt eksempel på mekanisk treakse-stabilisert kamera til bruk i en lavhastighets drone.

⁴⁵ Optimistisk tallmateriale rapportert fra Frost & Sullivan, California (1998)

⁴⁶ Stabilisering i 3- til 6 akser. Pekenøyaktighet, bedre enn 35 μ radianer, og innstillingsrespons (akselerasjon) 170grader/sekund² eller bedre. Det er vanlig med sleperingkontakter for 360° graders bevegelse, ellers normal signaloverføring for de øvrige aksene jmf. Wescam 16TS-I spesifikasjoner.

⁴⁷ Basert på tilgjengelig dokumentasjon og gjennomgang med salgsrepresentant fra Wescam Inc høst 2001.



Figur 3.6. Viser et enkelt eksempel på stabilisert videoovervåking. Konstruksjonstegninger av en forslått mekanisk treaksestabilisert kameraplattform (8 tommer størrelse), til bruk i en lavhastighets drone. Realisert i forbindelse med FFI UAV prosjektet, år 1999, ref.(23).

Andre nyheter. Raytheon AAS-52, multispektrale mållokaliserende system, har separate aperturer for termisk sensor og EO. Og inkluderer TV-vidvinkel og –spot med laserpeker og digital video samt seks-akset stabilisering, og et veltilpasset grensesnitt for mållokalisering (Hellfire). Fusjon, piksel for piksel, av IR og TV samt tre ulike automatiske følgemodi gjør dette til et komplett sensorsystem også for ubemannede plattformer. Raytheon har levert prototyper av AAS-52 MTS for Predator-kvalifisering med sikte på å kunne erstatte Wescam Modell 14TS/QS EO/IR Skyballturret.

3.2 Utviklingstrekk for elektrooptisk sensorteknologi

Den passive optiske sensoren er ikke like passiv lenger. I stedet for bare å registrere et todimensjonalt bilde er fremtidens optiske sensorer også signalbehandlere. Utviklingen er ikke bare avhengig av nye datamaskiner og moderne informasjonssystemer, men også av nye optiske strukturer som ikke er større enn en tusendels millimeter.

Utviklingen av optiske sensorer og muligheten til å anvende informasjonsteori på systemene, medfører at de ikke lenger er et optisk system alene, men utviklet seg til å bli integrerende optikk- og signalbehandler systemer. Systemets ytelse er avhengig av hvordan integrasjonen av sensorens konstruksjon og signalbehandling gjennomføres. Sensorsystemets kritiske kapasitet er gitt av balansen mellom sensorteknikk og signalbehandling ifølge (1).

3.2.1 Fremtidens optikk

Nanoteknikken er svært anvendbar innenfor optikken. Stadig mindre dimensjoner kan kontrolleres, noe som medfører at sensorsystemene blir mindre og kompakte med større ytelse. I dag behersker de aller råeste utviklingsmiljøene dimensjoner som er så små at kvantemekaniske fenomen oppstår. Det betyr at materialets egenskaper ikke bare er avhengig av selve materialtypen, men også på materialets mikrostruktur. For sensorsystemet innebærer dette at følsomheten for ulike spektrale bølgelengder styres av slike strukturer. Utviklingen går mot at elektronenes bevegelser kontrolleres i to og tre dimensjoner, noe som øker muligheten til å kontrollere sensorenes egenskaper. Utformingen av elektronikken smelter sammen med utformingen av selve sensoren slik at bildet kan leses ut raskere og signalbehandles nær sensoren. Da billedsensorene inneholder så store datamengder, kreves billedkompresjon for å lagre og overføre data. Billedkoding blir derfor en integrert del av informasjonsbehandlingen. På mekanikkområdet medfører nanoteknologien at svært små 'mekaniske' maskiner kan konstrueres. Området for disse kalles mikroelektriske mekaniske system, MEMS, og kommer til å spille en vesentlig rolle i fremtidens optikk.

Kort kommentar til teksten ovenfor. I (1) og sammendraget ovenfor, kan man lett få det inntrykk at MEMS og nanoteknologi er en og samme ting. Det er jo en glidende overgang, men nanoteknologi forstås mer å være på skala av enkeltatomer, mens MEMS er yttergrensen for vanlig mekanikk laget med "dreibenker og fresemaskiner". Sett utenfra er forskjellen ikke så stor, men de som arbeider i disse feltene vil ha problemer med å liste dem opp som en og samme ting.

3.2.2 Spektrale avbildningsteknikker

Informasjonen som fester seg til sensorens billedplate, fokal plan array, kan inneholde en blanding av egenskaper som etter signalbehandling omformes til et bilde som blir enklere å tolke. Blandingen kan bestå av vinkelinformasjon (sort og hvitt bilde), spektral informasjon (fargebilde), radiometrisk registrering (der strålingsstyrke sier noe om målet), polarisasjonsinformasjon (hvor et polarisasjonsfilter settes på) og tidsoppløst informasjon (såkalt tidsvisjonsavbildning av bevegelige mål i scenen som flytter seg relativt til bakgrunnen). Informasjonssekvensen kan etter signalbehandlingen presenteres i fire dimensjoner. To dimensjoner tilsvarer vinkelinformasjon, den tredje spektral informasjon og den fjerde utgjør

polarisasjon. Slike sensorer kalles flerdimensjonale. I stedet for å være begrenset til ett spektralbånd i det termiske bølgelengeområdet, noe som er mest vanlig i dag, kan mål detekteres og identifiseres i flere dimensjoner. GPS-⁴⁸ og gyroinstrumenter gir dessuten eksakt posisjon for observasjonen. Det er den totale mengden informasjon som skal optimeres, ikke bare den visuelle billedkvaliteten. Det betyr for eksempel at noen få spektrale bølgelengdebånd i kombinasjon med polarisasjonsegenskaper kan gi mer informasjon enn ytterligere spektralbånd uten polarisasjon. For å kunne håndtere all denne informasjonen kreves et kvalitetsstempel for hver rapporterte egenskap. Det er også dette som sensornær signalbehandling skal kunne realisere.

Et vanlig bredbåndskamera, sort/hvitt, integrerer og summerer spektralinformasjon over et stort bølgelengdeområde, $\Delta\lambda/\lambda \sim 100\%$, og relaterer til romlig vinkel. Et bredbåndsfargekamera måler gjennomsnittsverdier for rødt, grønt og blått fargebånd, eller avledede trefargesammensetninger, som blandes og relateres til romlig vinkel. Et multispektralt eller flerspektralt smalbåndskamera måler på et utvalg bånd, typisk 2 til 10 bånd, med tilsvarende bølgelengdeområde, $\Delta\lambda/\lambda \sim 10\%$. Bildene blir i praksis tredimensjonale kuber med spektralbånd over hverandre i hvert romlig oppløste punkt i bildet. Tilsvarende for hyperspektralt kamera som måler på opptil 100 sammenhengende 1%-brede bånd, $\Delta\lambda/\lambda \sim 1\%$. Hyperkamera gir en tilnærmet fullstendig karakteristikk av hele spektret. Synlig, nærinfrarødt til termisk. Hyperspektrale bildedata eksponert ved et enkelt tidsintervall er en kube (3D), men selv de beste elektrooptiske og termiske detektorer eksponerer og måler bare i et plan (2D). Grunnleggende utfordring for visualisering av hyperspektrale data består blant annet i å dele fotonstrømmen i skiver ved hjelp av avansert filtrering for todimensjonal presentasjon.

Hyperspektral avbildning har i praksis begrenset tidsoppløsning som følge av lagring og signalbehandling av store data mengder.

Advanced Power Technologies Inc (APTI), Washington DC, har utviklet et hyperspektralkamera kalt Aurora tilpasset for bruk i Predator i samband med 'Talon Radiance'-programmet til TENCAP⁴⁹. Kameraet kan blant annet avbilde 480-spektralbånd med 1,6nm breddeoppløsning i et spektralområde på cirka 400-900nm. Kameraet eksponerer 200-billedrammer per sekund for inntil 60 spektralbånd, se omtale i (51).

AFRL's SPIRIT⁵⁰ er en avansert teknologidemonstrasjon som pågår fram til og med år 2005, og fokuserer på bruken av HALE⁵¹ UAV som innsamlingsplattform av hyperspektral bildeinformasjon parallelt med innhenting fra avbildende radar (SAR) og SIGINT⁵²- sensorer. SPIRIT kan tenkes brukt i kombinasjon med farkostens radar.

Andre krafttak innenfor samme område er HyLITE⁵³ og RTIS⁵⁴, begge sponset av NVESD⁵⁵. HyLITE integrerer en langbølgeinfrarød spektral sensor med en høyoppløselig

⁴⁸ GPS - Global Positioning System.

⁴⁹ Talon Radiance program. USAF's Tactical Exploitation of National Capabilities 'Tanks under Tree' problem.

⁵⁰ SPIRIT. Spectral Infrared Remote Imaging Transition Testbed

⁵¹ HALE UAV. High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle.

⁵² SIGINT. Signal intelligence.

⁵³ HyLITE. Hyperspectral Longwave Imaging for the Tactical Environment.

⁵⁴ RTIS. Remote Tactical Imaging Spectrometer.

⁵⁵ NVESD. US Army Communications-Electronics Command's Night Vision and Electronic Sensors Directorate.

mellombølgeinfrarød sensor i en stabilisert taktisk pakke for sanntidsdeteksjon av kamuflerte og skjulte mål. Det vil si deteksjon og anvisning ved hjelp av hyperspektral avbildning og spektralavviksalgoritmer, synkronisert med høyoppløselig kamera, for å sørge for egnet avbildning til påfølgende billedanalyse. Versjoner av HyLITE er kompatibel med Predator og Global Hawk. RTIS-kameraet er et HSI⁵⁶-dagslyskamera som egner seg til bruk i taktisk-UAV som Shadow 200, Hunter samt Predator eller Global Hawk. RTIS-kameraet kombinerer synlig-/nærinfrarød- og kortbølgeinfrarødsensorer med høyoppløselig mellombølgeinfrarød-deteksjon i en rull-stabilisert pakke. I likhet med HYLITE sørger RTIS' spektraldeteksjon for at et høyoppløselig bilde blir transmittert via datalink til bakkeetasjonen ved behov.

Kort kommentar med referanse til UAV-utfordringer i (52), og SPIRIT-demonstrasjonen omtalt ovenfor: UAV-sensor nyttelast, det vil si utrustning for avbildende sensorer inklusive samband og navigasjon, er alltid en utfordring, men i forhold til andre viktige utfordringer som valg av UAV-operasjonskonsept, luftromskontroll, vær og overlevelse, er UAV-sensor nyttelast et MLU⁵⁷-objekt. Nyttelast kan oppgraders forutsatt tilgjengelig effekt og volum.

FFI har igangsatt arbeider på HSI gjennom prosjekt for spektrale avbildningsteknikker⁵⁸ og har initiert/støttet Norsk Elektro Optikk's (NEO) utvikling av Airborne Spectral Imager (ASI), et hyperspektralt kamera. Det er vist bilder fra ASI kameraet i neste kapittel, se Figur 3.7 og Figur 3.8.

Kort kommentar klippet fra (19): Det innhentes store mengder data fra våre dagers sensor-nettverk, og det meste av denne billedinformasjonen blir ikke sett på, i beste fall kun skannet igjennom. Dette problemet vil øke med en faktor på 10 til 100 med flerspektral- eller hyperspektralavbildning når disse teknikkene blir gjort tilgjengelig. Tilgangen på regnekraft fordobles fortsatt i henhold til Moore's lov, hver 18 måned, men dette vil ikke være nok. Ifølge Douglas Cochran (DSO⁵⁹ i US DARPA), er halvparten av de fremskritt som er rapportert innenfor billedbehandling de siste tjue årene, skjedd innenfor algoritmeutvikling fremfor som følge av økt regnekraft. Forstår jeg herr Cochran rett, mener han at det er godt håp om at multispektral- og hyperspektral avbildning vil kunne realiseres i sin fulle bredde, dels uavhengig av økningen i tilgjengelig prosessorkraft.

3.2.3 Små kontraster i målet

En kamp mellom midler og motmidler utkjempes naturligvis også på sensorområdet. Målene forsøker å unngå og bli oppdaget ved hjelp av signaturtilpasning. Jo bedre egenskaper fartøy og fly har til å gjemme seg, desto bedre må sensorene bli. Spektral avbildning i flere dimensjoner - sensorer som registrere flere målegenskaper enn konvensjonelle sensorer - kan gjøre det lettere å oppdage og skille ut objekter.

Forbedringer i evnen til å detektere, identifisere og gjenkjenne objekter vil nok i større grad

⁵⁶ HSI. Hyper Spectral Imaging.

⁵⁷ MLU. Midlife Update.

⁵⁸ En vesentlig del av prosjektet vil være et samarbeid med forskningsinstitutter i Frankrike, England, Tyskland, Sverige, Danmark, Nederland og Italia gjennom WEAG Thales JP 8.10 "Spectral Imaging Techniques". En viktig del vil også være fremstilling av et avbildende spektrometer ved Norsk ElektroOptikk. Dette spektrometeret vil bli brukt under feltmålingene i JP 8.10.

⁵⁹ DSO US DARPA. Defense Sciences Office US Defense Advanced Research Projects Agency.

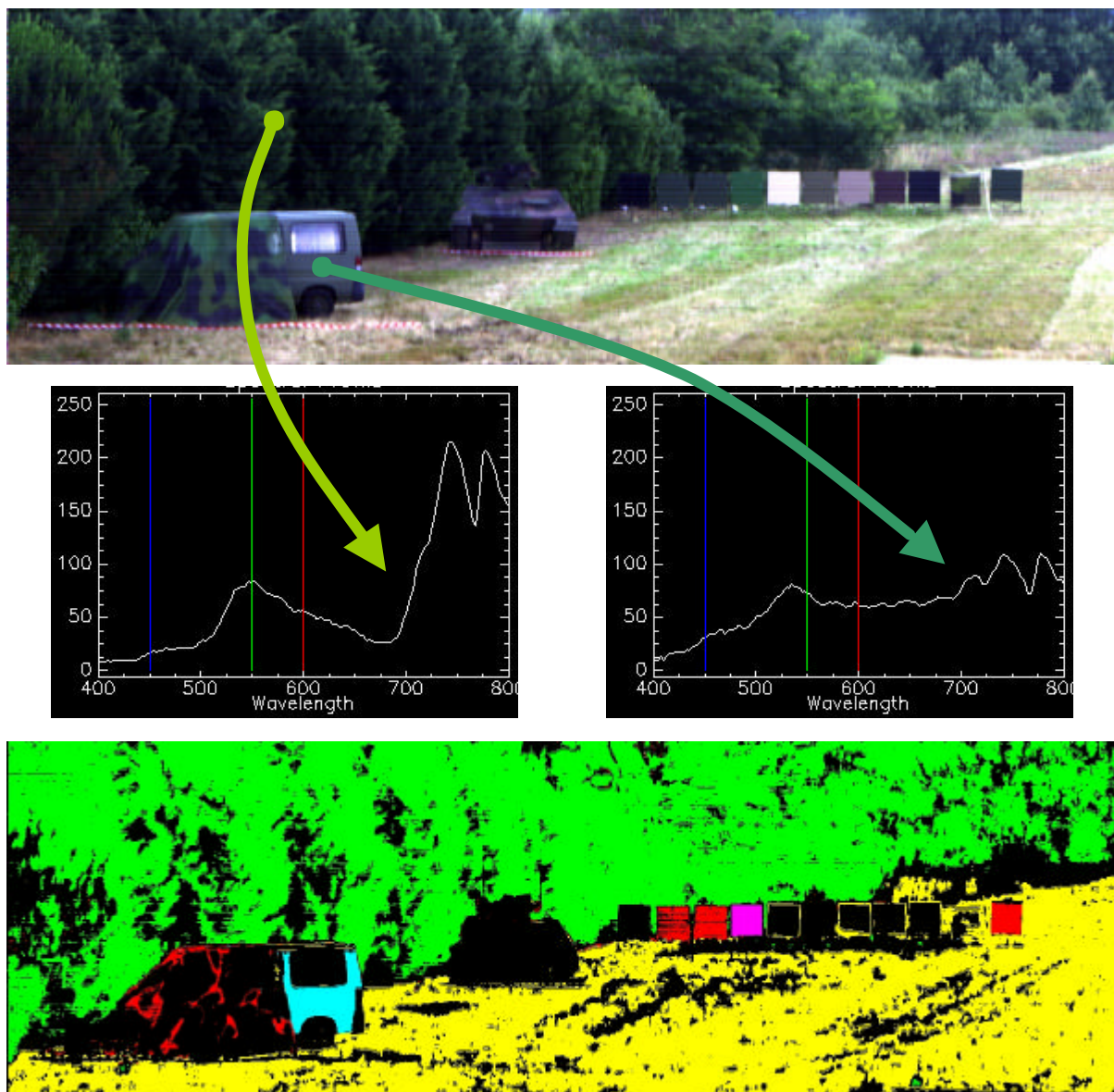
kunne realiseres ved hjelp av omfattende kjennskap til objekters signaturegenskaper, enn som følge av økt pikseloppløsning, ifølge (19). Et konvensjonelt todimensjonalt romlig bilde av et obskurt objekt av interesse vil med stor sannsynlighet ikke være tilstrekkelig for deteksjon uten at det kombineres med vibrasjon eller polarisasjonsdata for det samme objektet. Et mål kan skjules i en eller noen dimensjoner, men ikke i alle. Det vil bli vanskeligere å skjule seg i fremtiden.

Billedmaterialet og teksten nedenfor er bidrag fra FFI's prosjekt for spektrale avbildnings-teknikker, ref. (50).

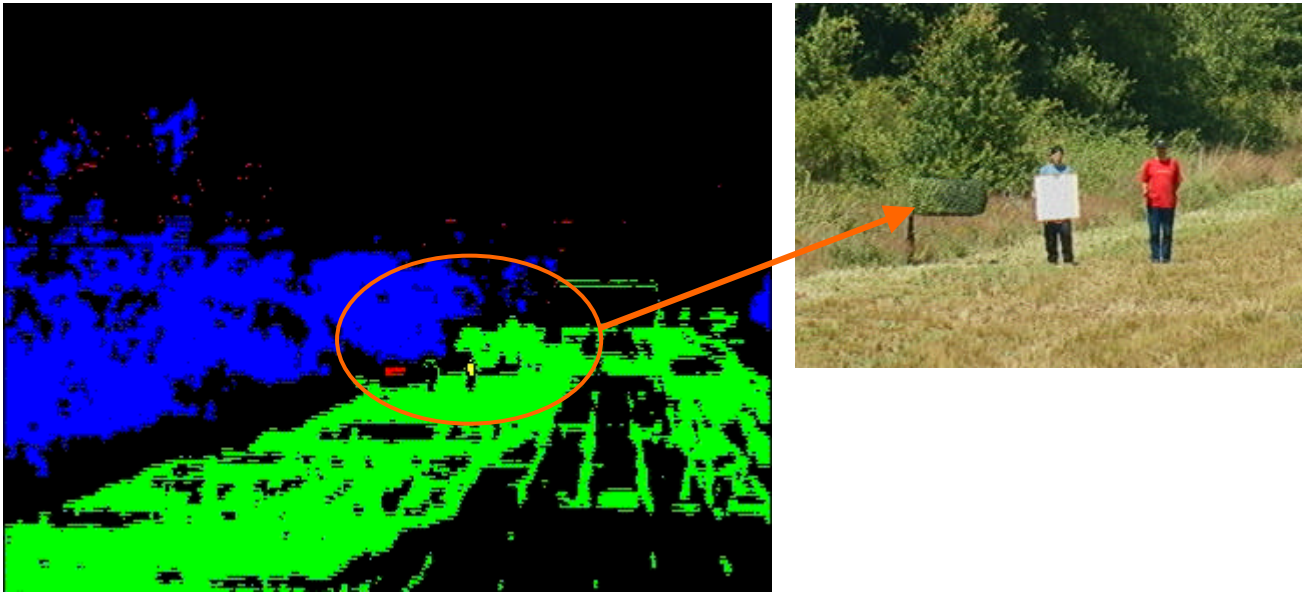
Billedprodukter fra hyperspektrale sensorer gir brukeren tilgang til en teknologi med betydelig potensial. Figur 3.7 viser eksempel på hyperspektral avbildning i det synlige og nær-infrarøde bølgelengeområdet. Bildet er tatt med FFIs utstyr under en feltmåling i Toulouse sommeren 2002 og viser et utvalg militære kjøretøyer, og prøver av ulike militære kamuflasjefarger. Det øverste bildet i Figur 3.7 viser de vanlige synlige primærfargene (rødt-grønt-blått). Spektre fra to utvalgte punkter i bildet illustrerer at to grønne overflater, som ligner hverandre sett med synlig lys, kan være svært forskjellige i det infrarøde området. Det nederste bildet er et foreløpig resultat av behandling av dataene, og illustrerer hvordan ulike objekter i bildet kan klassifiseres basert på deres spektrale egenskaper. Resultatet viser i dette tilfellet at de utvalgte kamuflasjefargene skiller seg så mye fra bakgrunnen at de lett kan plasseres i egne klasser, merket med ulike farger. Figur 3.8 viser eksempel på deteksjon av små objekter med hyperspektral avbildning. Bildet er fra samme feltmåling som Figur 3.7, og viser tre små objekter i en avstand på 400 m: en 0.3x1 m bit av kamuflasjenett, en hvit referanse og en rødkledd person. Bildebehandling kan her lett detektere kamuflasjenettet (merket rødt) og personen (merket gult). Merk at dette er foreløpige resultater for testformål, som neppe representerer ytelsesgrensen for spektral avbildning.

Tilleggsfiguren, Figur 3.9, utfyller HSI-målingene foran, og illustrerer at IR kanskje kan være like bra eller bedre for deteksjon i mange (ikke alle) tilfeller, men at hyperspektral avbildning kan ha fordeler når man ønsker å klassifisere objekter. For videre diskusjon se blant annet flersensoranvendelser og datafusjon i (47).

Tenkbare militære anvendelser foreslått for et hyperspektralt kamera, er deteksjon av kamuflerte objekter, deteksjon av små punktmål (<1 piksel), klassifikasjon av mål med tilstrekkelig spektral oppløsning (oppløst i ett piksel), søk etter nedskutt pilot med spektralnøkkel, kontroll av egen kamuflasje for egne stillinger med høy verdi, deteksjon av miner, passiv avstandsmåling, avbildning av gassutslipp og kartlegging av terreng og fremkommelighet.



Figur 3.7. Eksempel på hyperspektral avbildning i det synlige og nær-infrarøde bølgelengeområdet. Bildet er tatt med FFIs utstyr under en feltmåling i Toulouse sommeren 2002 og viser et utvalg militære kjøretøyer, og prøver av ulike militære kamuflasjefarger. Det øverste bildet viser de vanlige synlige primærfargene (rødt-grønt-blått). Spektre fra to utvalgte punkter i bildet illustrerer at to grønne overflater, som ligner hverandre sett med synlig lys, kan være svært forskjellige i det infrarøde området. Det nederste bildet er et foreløpig resultat av behandling av dataene, og illustrerer hvordan ulike objekter i bildet kan klassifiseres basert på deres spektrale egenskaper. Resultatet viser i dette tilfellet at de utvalgte kamuflasjefargene skiller seg så mye fra bakgrunnen at de lett kan plasseres i egne klasser, merket med ulike farger.



Figur 3.8 Eksempel på deteksjon av små objekter med hyperspektral avbildning. Bildet er fra samme feltmåling som Figur 3.7, og viser tre små objekter i en avstand på 400 m: en 0.3x1 m bit av kamouflasjenett, en hvit referanse og en rødkledd person. Bildebehandling kan her lett detektere kamouflasjenettet (merket rødt) og personen (merket gult). Merk at dette er foreløpige resultater for testformål, som neppe representerer ytelsesgrensen for spektral avbildning.



Figur 3.9. Viser IR-bildet av scenen i Figur 3.7. Kamouflasjenettet har her lav kontrast, mens det er tydelig klassifisert i det hyperspektrale bildet. Ellers gir solbelysningen her store kontraster også i IR. Til sammen illustrerer bildene at IR kanskje kan være like bra eller bedre for deteksjon i mange (ikke alle) tilfeller, men at hyperspektral kan ha fordeler når man ønsker å klassifisere objekter.

4 TAKTISK LIDAR⁶⁰/LADAR⁶¹ OG TREDIMENSJONAL AVSTANDSMÅLING

Moderne bruk av laserteknologi gir store muligheter. Utviklingen er omfattende og gjelder både for sivile og militære nyvinninger. Og når laserteknikk kobles sammen med ny optisk teknologi oppstår spennende muligheter ifølge (2).

Lyskilden er naturligvis sentral i taktisk laserbaserte sensorsystemer. Den store utfordringen består i å ta frem laserkilder for det infrarøde bølgeområdet⁶² blant annet for å minske atmosfærens dempning ved dis og tåke. Tenkbare lyskilder er lasere av halvledere i kombinasjon med fiberoptiske forsterkere eller minilasere. Koherente systemer muliggjør avbildning av vind- og strømningsfelt noe som har betydning for luftfarkoster, utlegging av motmiddel, våpenkorleksjon og mye mer. En laser med slike funksjoner kalles taktisk lidar, og inneholder også måling og gjenkjenning av 'harde' mål. Utviklingen av laserdioder på det infrarøde bølgeområdet (såkalte kvantekaskadelasere), kan innebære at stråling med bølgelengder i området en tiendedels millimeter enten genereres ved direkte modulasjon eller at flere laserfrekvenser blandes. Dette innebærer mulighet for kommunikasjon og avbildning i tåke med fortsatt høy båndbredde og liten spektral utsmøring. Med ny laserteknikk i det ultrafiolette området⁶³ kan man detektere og klassifisere biologiske stridsmidler. Når det gjelder laser med høy pulsenergi og effekt for å angripe sensorer og beskytte egne farkoster, konsentreres innsatsen innenfor diodepumpende faststofflasere. I et lengre perspektiv ser man for seg å utvikle såkalte fri-elektronlasere som kan generere innenfor anvendbare bølgelengdeområder med høy effekt. Men det vil drøye minst ti år før denne teknikken kan anvendes fra flyttbare plattformer.

Lasersnitt i tynne skiver er en allerede eksisterende teknikk som utnytter laserens egenskaper til å måle avstand. Når sensoren har fanget inn objektet sender den laserpulsene så tett at skiver som kan ligge på en desimeters avstand, til sammen danner et tredimensjonalt bilde av objektet. Det amerikanske missilet, Locaas, anvender denne metoden. De registrerte bildene kan roteres og sammenlignes med bilder i et bibliotek. Metoden kalles for nettverksavbildning. Fremtidens laser kommer til å generere en tredimensjonal sanntidsvideo med centimeteroppløsning. Kombinert med elektrooptiske sensorer vil dette kunne realiseres ved belysningen fra laser (nanosekundpulser) og fremstille bilder med cirka 15centimeters avstandsoppløsning i hvert bildepunkt. Utviklingsmiljøer arbeider i dag med å utvikle tredimensjonale fokalplandetektorer med tusenvis av billedpunkter for blant annet dette formålet.

LADAR-/LIDAR-basert avbildning vil være komplementære med tradisjonelle radarer som følge av mulighetene til å bygge tredimensjonale bilder av suspekterte mål i sanntid, og som følge av forbedret oppløsning fordi det opereres på optiske frekvenser, se testresultater for flybåren LADAR i (63). Kombinasjoner av todimensjonal avstandsmåling og vibrasjon/polarisasjonsanalyse i samme fokal plan som benyttes for optisk avbildning, vil selvsagt være svært effektiv.

⁶⁰ LIDAR er et akronym basert på frasen 'light detection/directing and ranging laser'. Forstått som et aktivt laserbasert måleinstrument for registrering av punkt- og/eller linjeprofiler.

⁶¹ LADAR. '(Range-gated) laser imaging radars'. Billeddannende lasersensor for 2- og 3-dimensjonal avbildning.

⁶² IR. Infrarødt spektralområde, med bølgelengder i området $\sim 1\mu$ til 15μ der $\mu=10e-6$ meter. IR-laserkilder er et godt eksempel på et elektrooptisk teknologiområde som er militærdrevet.

⁶³ Ultrafiolett spektralområde, ~ 10 nm til 400 nm der nm= $10e-9$ meter.

5 PASSIV MILIMETERBØLGELENGDE SENSOR

Alle naturlige objekter som har temperatur over absolutt null stråler (emitterer⁶⁴) i millimeterbølgebandet. Passive millimeterbølgesensorer mottar energi som emitteres eller transmitteres fra andre kilder (som naturlige objekter).

I romforskning benyttes mottagere av denne type for å samle signaler fra fjerntliggende stjerner og galakser. Passive millimeterbølgesensorer (også kalt radiometere), med operasjonsområde i mikro- og millimeterbølgeband spektrumet, blir også plassert på værsatellitter for måling av atmosfærisk temperatur og luftfuktighetsprofiler. Dette er data som gjør nytte i sivil og militær værvarslingstjeneste.

I 'fire-and-forget'-våpen, benyttes millimeterbølgesensorer som en del av sensorutrustningen for deteksjon av mål.

Passive sensorer gjør nytte i elektronisk overvåkningstøttede systemer (ESM⁶⁵) hvor de lokaliserer og målfølger energikilden som stråler fra et potensielt mål. I en elektronisk overvåkning-støtteapplikasjon kan energien være transmittert av en annen sensor som en radar. I de fleste radiometriske anvendelser er den mottatte energien emittert av et målobjekt, bakgrunnen eller atmosfæren.

I militære anvendelser benyttes passive millimeterbølgesensorer i hovedsak til deteksjon av metallobjekter som pansret motorisert kjøretøy, drivstofflagringstanker og skip. Båndbreddeområdet⁶⁶ tilpasses anvendelsen og bruken av apparaturen. Det valgte frekvensområdet bør ha bølgelengder som er mindre enn størrelsen på objektene som skal detekteres. Da militære mål i det alt vesentlige består av metallkomponenter, er overflateemisjonen liten. Metallflater sett fra luften vil reflektere atmosfæren. Siden atmosfærestråling er betydelig mindre enn jordoverflatestråling, eksisterer det en kontrast mellom energinivåer som gjør deteksjon mulig.

Passive millimeterbølgesensorer har en fordel fremfor elektrooptiske sensorer ved at de har kapasitet til å se gjennom skydekket, og at de kan gi høy kontrast på metallobjekter i millimeterbølgespektrumet. Passive millimeterbølgesensorer har fordeler fremfor aktive radiofrekvenssensorer (avbildende radar), som følge av lavt støynivå og ingen utsendte radar blink. Se for øvrig sammenligning av aktiv og passiv sensorteknologi i Figur 8.1.

Den kjølige atmosfæren (~35Kelvin) blir reflektert i millimeterbølgelengdefrekvenser fra metallobjekter med jord- og landreflekser som bakgrunn (betegnet clutter i faglitteraturen med typisk temperatur 300Kelvin). Tilgjengelige måleutstyr (radiometere) kan avbilde millimeterbølgespektrumet med typisk temperaturfølsomhet ned i 2Kelvin (med signal/støy forhold bedre enn 300 til 1).

Andelen stråling som naturlig emitteres i millimeterbølgebandet, er 10^8 -ganger mindre enn mengden utstrålt energi i det infrarøde området. Moderne millimeterbølgemottakere har minst

⁶⁴ Emit (eng.) i betydningen utstråle, avgi, utsende eller sende ut energi.

⁶⁵ ESM. Electronic Support Measures.

⁶⁶ Atmosfæriske transmisjonsvinduer for mmW-sensorer finnes ved følgende frekvenser 35, 94, 140, 225 og 350 GHz i følge (47).

10^5 -ganger bedre støyundertrykking enn infrarøde detektorer, mot at IR-sensorer detekterer med betydelig bedre relativ følsomhet (temperaturkontrast). Forskjellen i målt temperaturkontrast mellom de aktuelle sensortechnologiene gjenoppretter styrkeforholdet (dvs marginen 10^3 i favør IR), og gjør at ytelsen til den jevne millimeterbølgebildesensoren kan sammenlignes med IR, ref. (54). Foruten basis teori, gjennomgår bidragsyterne til artikkelen referert ved (54), ulike metoder for millimeterbølge deteksjon, og deres kostnadsanalyser viser blant annet at skannede systemer per dato er mer kosteffektive enn stirrende millimeterbølgebaserte systemer.

I den sistnevnte kategorien deteksjon, stirrende millimeterbølgebaserte mottakere, rapporteres det om et passivt millimeterbølgebasert billedsystem til bruk i helikopter (UH-1H 'Huey' og UH-60 'Blackhawk'), som operer i nær sanntid (dvs. integrasjonstider mindre enn 25 millisekunder for hele fokalkanalen), og som viser 192x128-piksel bilder med 0.35 grader romlig oppløsning over et 20x30 grader synsfelt med 2K temperaturfølsomhet. Billedsystemet (med 30Hz bildeoppdatering) inkluderer en flat dielektrisk antenne (24x24 tommer), W-bånds forsterkere, detektorer og prosessorer som til sammen veier ca 75 kg, ref. (55).

Passive millimeterbølgekamera tilsvarende videokamera er under utvikling av TRW⁶⁷. Kameraer har blitt testet fra bakkeplan ved 60 GHz, 65 GHz, 89 GHz og 95 GHz frekvenser. Array størrelser opp til 40x26 elementer har blitt produsert. Synsfelt med 0.4 meter til 0.6 meter datarekkevidde i diameter er tilgjengelig. Billedrammedata på 17 Hz er demonstrert. Flyprøver med passive mmW kamera er gjennomført ifølge (16).

De beste sensorer til å se gjennom skydekke og regn er avbildende radarsensorer. Radarsensorer har neglisjerbar demping ved frekvenser under 10GHz. Ved høyere frekvenser er passive millimeterbølge sensorer begrenset med 2 til 5 km sikt gjennom skyer og regn. De oppgitte siktallene forutsetter en skybasehøyde på 5km, maks skytykkelse på 2km og regnrate inntil 4mm/time. Dette er kosteffektive tall for operasjon med UAV. Det vil være unødvendig restriktivt å operere med 100% værtilgjengelighet for UAV-systemer (det vil si inkludere operasjoner i tordenvær, sykloner og orkaner), ifølge (16).

Ulemper med passive millimeterbølgesensorer er lav oppløsning sammenlignet med elektrooptikk og avbildende radar sensorer (og den nevnte demping i skydekke og regn).

Passive millimeterbølgesensorer er en relativ umoden teknologi. I en fremtidig tidshorisont på ti år vil vi med stor sannsynlighet ha distribuerte aperturer for operasjon av høyoppløselige passive millimeterbølgesensorer. Distribuerte synsområder bestående av ti eller flere romlige aperturer, vil da kunne sørge for et effektivt synsfelt som vil være sammenlignbart med vingspennet til en UAV, (f.eks ved at man bruker deler av vingspennets underside til antenne). Vi antar at det er den effektive inngangsaperturen til MMW-systemet som kan være sammenlignbar med vingspennet til en UAV. Dette bestemmer tilgjengelig oppløsning (i en retning, for lineært sensorarray). Synsfeltet vil derimot være begrenset av enkeltsensorenes synsfelt og eventuelt av hvordan dataene behandles.

Mer om passive millimeterbølgesensorer i (47).

⁶⁷ www.trw.com

6 AVBILDENDE RADAR (SAR)

Alle radarsystem benytter elektromagnetiske bølger. Pulsede radarsystemer beregner distansen til målet ved hjelp av transporttiden til radarpulsen, mens kontinuerlige radarbølge-systemer måler den radielle komponenten til målets hastighet basert på doppler-skift. Kontinuerlige radarbølge (CW⁶⁸)-systemer sender på en frekvens hele tiden og mottar frekvensavvik. Høyere frekvens i retur indikerer at målet kommer mot radaren, lavere frekvens at målet fjerner seg fra radaren. Ingen endring i frekvens indikerer at målet står stille.

De fleste kommersielt tilgjengelige radarsystemer opererer i X, C, S og L båndet (som 3cm til 25 cm bølgelengder). Andre bånd benyttes til mer spesialiserte anvendelser (som overhorisonten radar, radar altimeter (høydemåler), anti-kollisjons radar). I tabellen (A.2), er radarbåndene listet opp med frekvens- og bølgelengdeområde samt egenskaper og eksempler på anvendelser. I teksten nedenfor presenteres radaranvendelser som kan være interessante for UAV. Lavfrekvent (VHF) radar (6.1.1), lavfrekvent (UHF) radar (6.1.2), mikrobølgebasert radar (6.1.3), og millimeterbasert radar (6.1.4) gjennomgås.

6.1 SAR anvendelser

Prinsippet for SAR (syntetisk apertureradar), se appendiks (A.1.1) og (13), bygger på relativ bevegelse mellom antenne og mål. Radarantennen sender ut pulser og tar imot pulsbølgeformer når disse reflekteres, se appendiks (A.1.2). Tidsforsinkelsen mellom puls og ekko er avstandsavhengig og varierer over et belyst mål som følge av at antennen forflytter seg. Ved hjelp av signalbehandling (SAR-prosessering) dannes høyoppløselige radarbilder fra mange pulser. I mikrobølgebåndet, (cm – dm bølgelengder), er det mulig å fremstille bilder med svært høy oppløsning (ned til omkring 1 dm), ulempen er at dekingen er begrenset og at høye frekvenser dempes av vegetasjonen og at det er relativt enkelt å unngå og bli oppdaget. I radiobåndet, (dm – m bølgelengde), er dempningen av vegetasjon mindre og det blir vanskeligere å gjemme seg. Men samtidig er oppløsningen dårligere ifølge (12). Ulempen med avbildende radar (SAR) er tung signalbehandling. I øyeblikket sørger UAV-systemer med avbildende radar for SAR-prosessering i bakkestasjonen, noe som krever bredbåndstransmisjon med stor kapasitet.

6.1.1 Lavfrekvent radiobåndbasert (VHF-) radar

Lavfrekvent radar (VHF) i 20-90 MHz området (CARABAS⁶⁹), har den fordel at den ser igjennom skogen og har stor dekningsgrad for forandringsdeteksjon (CD). Ulemper er dårlig oppløsning, støyutsatt antenne og at den ikke detekterer bevegelige mål.

Ved måldeteksjon utnyttes de særdrag som skiller målet fra bakgrunnen. Om målet rører på seg i forhold til bakgrunnen får målet en såkalt dopplerfrekvens som avviker fra bakgrunnen.

Problemet er at også bakgrunnen rører på seg i forhold til antennen. Dette fenomenet kalles doppler utsmøring eller 'forbredding' og innebærer at relativbevegelsen til bakgrunnen kan skjule signaler fra langsomme objekter⁷⁰. Stor antenne i forhold til bølgelengden kan redusere slik dopplerutsmøring. Det er også mulig å benytte flere antenner og ved hjelp av

⁶⁸ CW. Continuous wave radar.

⁶⁹ CARABAS. 'Coherent All Radio Band Sensing' er en lavfrekvent (20-90 MHz) SAR-radar utviklet for det svenske forsvaret av FOI, industrialisert av Ericson.

⁷⁰ Global Hawk nyttelastspesifikasjon har oppgitt MTI-modus med 4 Kts som minste detekterbare hastighet.

signalbehandling undertrykke bakgrunnen. Teknikken kalles GMTI⁷¹ og inngår blant annet i det amerikanske flybårne overvåkningssystemet *Jointstars*. GMTI-systemene benytter mikrobølgebåndet og har dermed vanskeligheter med å oppdage objekter som befinner seg under vegetasjon. *Jointstars* vakte stor oppmerksomhet under Gulfkrigen. Det fungerte meget bra i ørkenen, men kunne ikke oppdage stridsvogner i Kosovos skoger og ble derfor ikke anvendt i denne krigen, ifølge (12).

6.1.2 Lavfrekvent radiobåndbasert (UHF-) radar

Lavfrekvent Lora⁷² (UHF-) radar i 200-800 MHz området, har den fordelen at den ser igjennom skogen og har stor dekningsgrad (i tid) for bevegelige mål (GMTI). Men den kan kun se detaljer med relativt lav oppløsning (SAR), dekker lite overflateareal og har stor antenne.

Nye radarsystem utvikles i radiobåndet (200-800 MHz) i et forsøk på å minske innvirkningen av vegetasjon. Om objektet er stillestående og siden beveger seg, alternativt gjemmer seg, eller om det dukker opp nye objekter i scenen, er det mulig å benytte forandringsdeteksjon⁷³. Dette er en teknikk som minner om GMTI. Flere overflygninger gjennomføres over området og siden leter man etter forandringer. Dette er en robust deteksjonsmetode ved lave radar frekvenser (20-90 MHz). De lave frekvensene er ufølsomme for variasjoner på desimeterskalaen og forstyrres derfor ikke av små bevegelser som for eksempel vaiende greiner eller virvlende løv. Ved høyere frekvens fungerer forandringsdeteksjon dårligere som følge av at mindre elementer registreres. Metodene, GMTI ved radiobåndfrekvenser i UHF båndet og forandringsdeteksjon, CD i VHF båndet, kan utfylle hverandre. De kan opereres både fra samme eller ulike plattformer. DARPA samarbeider med USAF og hæren med FOPEN SAR, som operer simultant i VHF- og UHF-båndet for å kunne detektere stasjonære objekter under kamuflasje og vegetasjon. Sensoren er planlagt testet neste år, 2003. Forbedringer i dynamisk målsøking kan forventes i FOPEN SAR ved bruk av teknikker utviklet i HRR⁷⁴- prosjektet ifølge (19). Dynamisk målsøking (GMTI⁷⁵) kan detektere mobile objekter over et stort område, men kan per i dag ikke klassifisere objektene. Mens SAR kan klassifisere disse objektene, men bare hvis de står i ro.

6.1.3 Mikrobølgebasert radar

Mikrobølgebasert radar i 1-30 GHz området, ser detaljer med meget stor oppløsning (SAR), og har stor dekningsgrad (i tid) for bevegelige mål (GMTI). Liten antenne. Men ser ikke gjennom vegetasjon og dekker lite overflateareal.

Innen man har besluttet eventuell stridsinnsats, har man på forhånd avklart om objektene i scenen er fiende, venn eller ikke-stridende. Ulike situasjoner krever ulike sensorløsninger og metoder for identifikasjon. Handler det om store områder som skal avdekkes og operasjonene skal være mulig i alle tenkelige værforhold, så duger egentlig bare radar- og signalovervåkning. Den sistnevnte metoden gir gode sjanser for identifikasjon forutsatt at objektene sender ut signaler som det er mulig å fange opp. Hvis ikke, må man stole på radarteknikken. Identifisering ved hjelp av SAR er mulig med høyoppløselige metoder, se (24). Oppløsningen bør være i

⁷¹ GMTI. Ground Moving Target Indication.

⁷² Lora. Low frequency radar (200-800 MHz) SAR under utvikling av FOI.

⁷³ CCD. Coherent Change Detection, billedforandringsdeteksjon.

⁷⁴ HRR. High-Range-Resolution Air-to-ground Recognition Program (SHARP) US Air Force Research Lab.

⁷⁵ Kanskje med unntak av RTIP-radaren, mhp klassifisering av objektenes ytemål i kombinasjonen SAR/GMTI.

desimeter. Uansett vil radarskyggen⁷⁶ bak målene være informasjonsrike og kanskje umulige å gjemme. SAR- metoder anvendes for positiv identifisering, i hvert fall når målene står fritt.

Man kan spørre seg om det er mulig å identifisere objekter som er kamuflert i vegetasjon? Det pågår arbeid hvor man forsøker å kombinere avbildende radar i mikrobølgebåndet, GMTI, med radiobåndbaserte SAR-radarteknikker for å realisere dette. Ved å følge målet, enten på forhånd eller etter at det har gjemt seg i vegetasjonen, kan den høyoppløselige GMTI-radaren benyttes for positiv identifikasjon.

Målidentifikasjon ved hjelp av radar er et vanskelig forskningsområde. Det finnes nye ideer på området, blant annet bi- eller multistatiske radarsystemer, se eksempel i kapittel 6.1.4. Sistnevnte skulle kunne minske sårbarheten ved at senderen flyttes fra stridsområdet mens mottagerne som er stille, gjøres små og dermed kan få plass på mindre UAVer, se (22).

Flere kommersielle aktører tilbyr lettvekt SAR/GMTI-radarer. GA/SNL AN/APY-8 LynxSAR er et lett SAR-system med nær sanntids avbildning. SAR-systemet er resultatet av et samarbeide mellom Sandia National Laboratories (NM) og General Atomics (CA). Den er ment for UAV, RQ-1A Predator, I-GNAT og Prowler II, men kan også installeres på andre plattformer. Vekten er 52kg, og den kan veksle mellom SAR-bilder (stripmap og spotlight, se appendiks (A.1) for illustrasjon av LynxSAR-moder i Figur 8.2) og nær sanntidsbasert dynamisk mållokalisering, fra luft til bakke, GMTI, for rekognosering under varierende værforhold med støtte for høy billedoppløsning og bredt billedfelt. USN⁷⁷ støtter KAATS⁷⁸ som bringer stereo SAR-billedprosessering som CCD-billedforandringsdeteksjon og relativ GPS-algoritmer sammen. UAV med assosiert bakkekontroll finner ved hjelp av radar målet geografisk lokalisert innenfor celler ned i 1 meter i tre dimensjoner. KAATS prosesserer informasjonen og sender måldata til en presisjonsvåpenbærer i luften, uttesting siden november år2001. GA/SNL AN/APY-8 LynxSAR er i prinsippet til salgs. Spesifikasjoner se appendiks, (A.1.3).

EADS i tyskland begynte utvikling av sin Miniature SAR (MISAR, 4 kg) i mars år2002, og forventer å fly denne om bord i LUNA X-2000 UAV neste år (2003). Dette er en Ka-bånd radar som forventes å forbruke 50W, og ha områdedekning fra 500m-2000m bredder med oppløsning på 50cm. TNO Physics & Electronics Laboratory, Nederland utvikler MiniSAR som forventes å bli en billig og lett (mindre enn 50 kg), X-bånd radar (år2004). MiniSAR består av en aktiv tredelt antenne (phased-array) struktur (med 15 cm diameter per element). TNO predikterer 30-50 cm oppløsning under varierende værforhold og 5 cm i spot modus, ifølge (19). Ericson (Erieye) og Thales Airborne Systems (SARIS) samt Elta (EL/M-2055, 56 kg) er SAR utført eller skalerbare for UAV med strip, spot og MTI moder. SAR moder se appendiks (A.1).

⁷⁶ Radarskygge- og 'layover'-problematikk se appendiks (A.3).

Eksempel 1. En homogen stolpe belyst fra flybåren radar vil gi maks refleksjon i toppen. Avbildningen vil være et punkt (, selve stolpen) og en strek (, skyggen av stolpen). Punktavbildningen skyldes at alle strålere langs et kuleskall vil avbildes i ett punkt. Skyggen gir verdifull informasjon til avbildningen hvis man med skygge mener, $\Delta\delta = h \cdot \tan\theta$ hvor h er høyden til stolpen og θ radarsquintvinkelen. Radarbildet av stolpen er $\Delta r = h / \tan\theta$.

Eksempel 2. Fjordlandskap avbildet fra flybåren radar. Kombinasjon av 'layover' og skygge kan hindre radaren å se fjorden fra skrå vinkel. Minimaliserer overlay ved å fly 90°-grader på fjorden. Kompromiss mellom skygge og overlay er å fly 45°-grader på fjordarmen. Skygge og 'layover' kan hindre eller fortegne radaravbildningen.

⁷⁷ US Naval Air Warfare Center Weapons Division at China Lake.

⁷⁸ KAATS. Kill Assist, All Weather Targeting System.

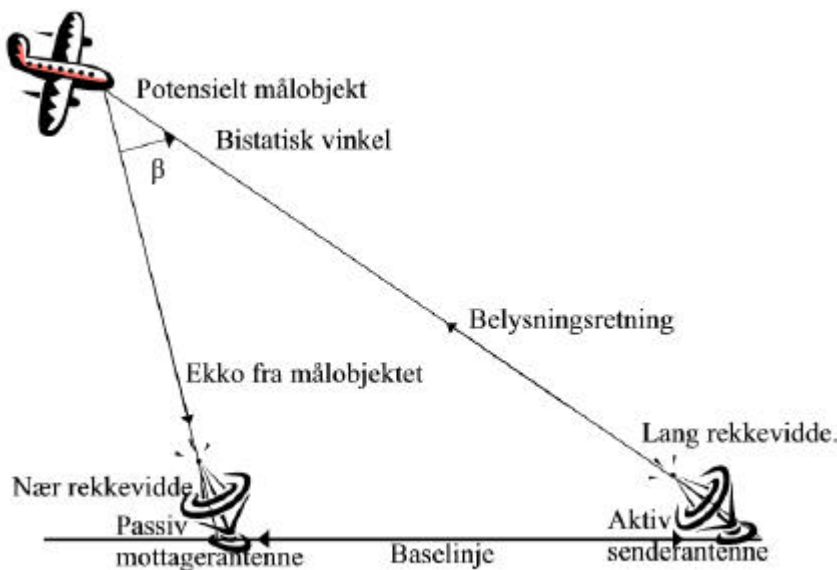
6.1.4 Millimeterbølgebasert radar

Radarsensorer opererer innenfor frekvensbånd som er gitt bokstavkombinasjoner som vist i Tabell 8.ii. Frekvenser i K-båndet(18 –26.5GHz) og nedover i tabellen, er vanligvis referert til som mikrobølge, og Ka-båndet(26.5-40GHz) og høyere er millimeterbølge.

Fordeler med millimeterbølgeradar (30-300GHz) er liten størrelse, stor båndbredde, høy avstandsopløsning, liten lobebredde og mindre atmosfærisk demping enn IR, laser og optisk, ifølge (20). Basiskomponenter for millimeterbølgebasert radar er dyre.

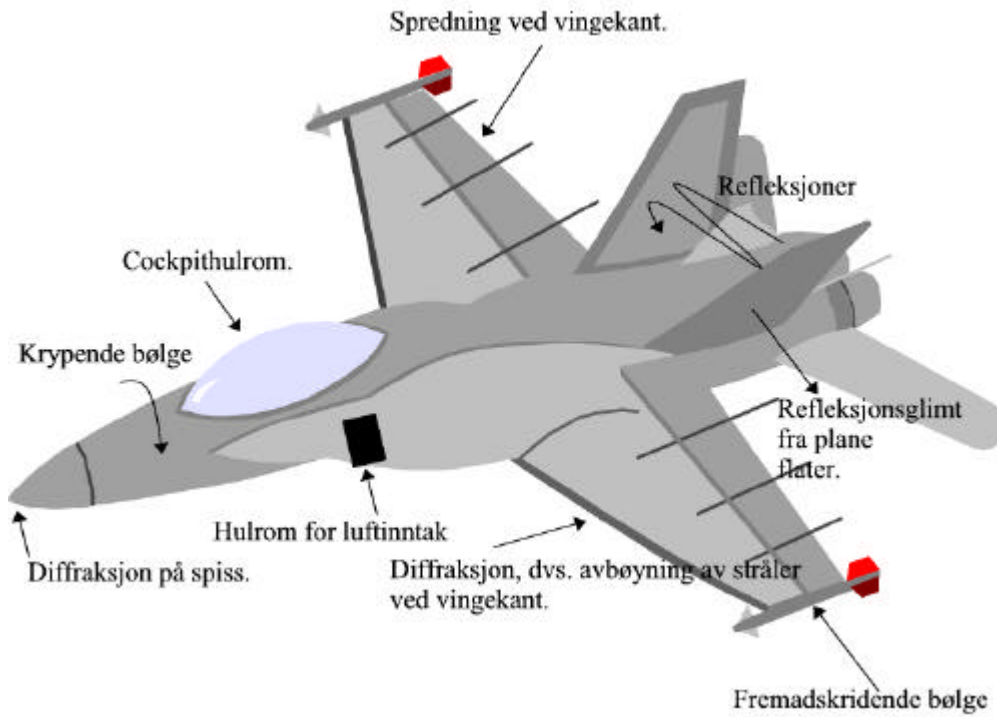
Aktive sensorer slik som millimeterbølgeradar, opererer i monostatisk og bistatisk konfigurasjoner. I monostatisk modus, er sender og mottager sammenstilt, og mottageren prosesserer energi som er reflektert fra objekter i synsfeltet. I bistatisk mode, vist i Figur 6.1 nedenfor, er sender og mottager separert. Mottageren prosesserer den transmitterte energien som reflekteres og spres i retning mottagerantennen fra målobjekter i synsfeltet. Når den bistatistiske vinkelen, β , går mot null, endrer konfigurasjonen seg til å bli monostatisk. Det er færre bistatistiske applikasjoner enn monostatistiske. Men de finnes brukt i anvendelser som krever deteksjon og målsøking av objekter med lavt radartvernsnitt ('stealth' mål), i luft til bakkekamp scenarier, under satellittfølging, i semiaktiv målfølging av missiler, og for øvrig i situasjoner der passiv deteksjon/målfølging er påkrevd.

Ytterligere fordypning i millimeterbølgebasert radar, se (64) og (47).

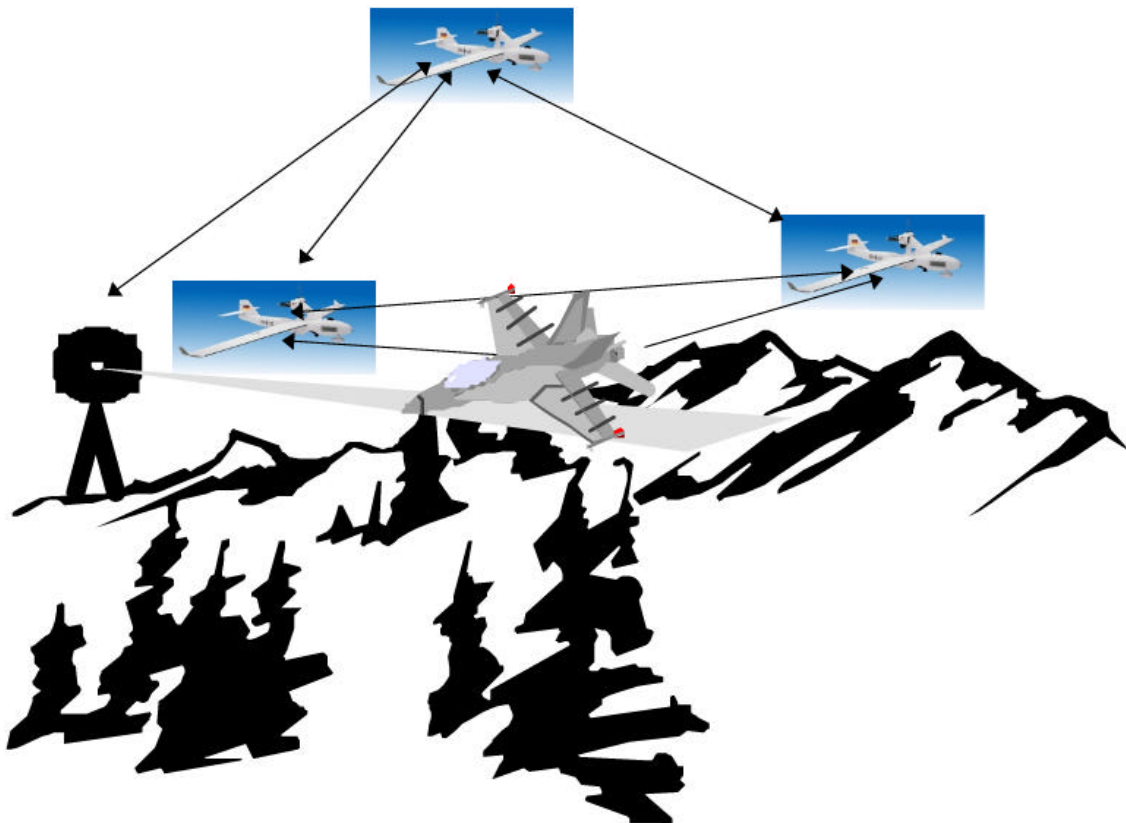


Figur 6.1. Bistatisk radargeometri, ref. kapittel 2 i (47).

UAV er en sentral kandidat som bærer av fremtidige radarsensorer. UAV i bistatistiske radar-konfigurasjoner kan være aktuelt som følge av behov for billigere plattformer og for å redusere kostnader. UAV kan sannsynligvis bidra i framskutte systemer for deteksjon av kryssermissiler og kanskje øke 'seigheten' til det distribuerte sensornettverket, ifølge (63). Motmidler og geografisk lokalisering av bakkeradarsystemer fra fly, se (22).



Figur 6.2. Spredning av mikro- og millimeterbølger. (A.E Fuhs RCS lecture notes.)

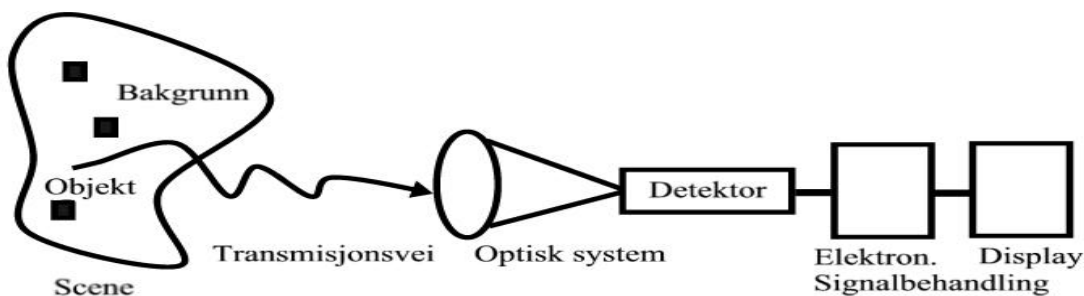


Figur 6.3. UAV i bistatisk radarkonfigurasjon. UAV-båren passiv mottagerantenne.

7 TERMISK AVBILDNING

I likhet med deteksjon av optisk stråling, er en termisk billedsensor en passiv enhet og vanskelig å oppdage i en stridssituasjon. Vi ser her bort fra aktiv infrarød deteksjon ved hjelp av belysning fra laser. Anvendelsen er uavhengig av omgivelsesbelysningen da den termiske billedsensoren er sensitiv for infrarød stråling. Med infrarød stråling menes bølgelengder λ mellom 3μ og 15μ (hvor $1\mu=10e-6$ meter). Dette er stråling som emitteres på naturlig vis fra alle observerbare objekter. Den termiske avbildningen er i motsetning til et ordinært fotografi basert på varmestråling slik at både en hvit og mørk hudet mann er 'hvite' på den termiske filmen. En isbjørn er derimot helt 'sort' i samme utsnitt med tilsvarende skalering. Termisk avbildning avviker en hel del fra fotografisk avbildning. Vi må derfor lære å tolke termisk avbildning. I Figur 7.1 nedenfor vises hele deteksjonskjeden ved en termografisk avbildning. Ytterligere fordypning se (17) og (47). Figur 3.9 viser et IR-bilde tatt med FFIs utstyr under feltmåling.

Teksten som følger vil forsøke å gi en beskrivelse av termisk stråling (7.1), og transmisjon (7.2) i atmosfæren. Videre vil den vise til trender for kjølt (7.3), og ukjølt detektorteknologi (7.4), og utfordringer i forbindelse med optiske systemer for infrarød deteksjon (7.5). Presentasjonen vil forsøke å forholde seg til deteksjonskjeden med temavandring fra venstre mot høyre.

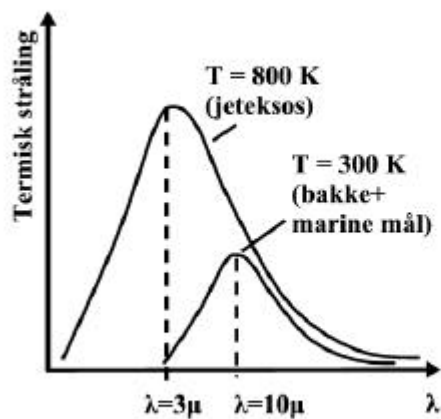


Figur 7.1. Deteksjonskjeden, ref. (25).

7.1 Termisk strålingsteori

Infrarød termografi er basert på de termiske strålingslover etablert av Planck, Wien og Stefan-Boltzmann, illustrert ved Figur 7.2 nedenfor. Wien's forskyvningslov, uttrykker bølgelengden ved maksimal utstråling, $T \times \lambda_{\max} = 2893$ (μK), som forklarer oss hvorfor jeteksosen med kjernetemperatur på opptil ($T=800\text{K}$) eller varmegangen etter et missil best kan detekteres av en 3μ til 5μ termisk billedsensor, mens en detektor utformet for 8μ til 12μ området er ideell for termisk avbildning av objekter med overflatetemperaturer rundt 300K . En termisk billedsensor vil 'se' effekten P_r , utstrålt fra objektet, det vil si produktet, $R=\epsilon\sigma T^4$, hvor σ er Stefan-Boltzmanns universal konstant mens ϵ er kalt emissivitet. Emissivitet er definert som en overflates evne til å emittere (avgi) strålingsenergi sammenlignet med et sort legeme ved samme

temperatur og med samme overflateareal. For en gitt termisk billedsensor, og ved en gitt distanse til objektet følger det at den termiske detektoren ser produktet, ϵT^4 , fra overflaten til objektet, det vil si den termiske billedsensoren omdanner varmemønsteret av reduserte ϵ der emissiviteten er en dimensjonløs faktor innenfor intervallet 0 til 1. Emissiviteten kan variere med retningen til målingen og er en funksjon av type materiale, eller mer spesifikt, av overflatetilstanden til det observerte materialet da termisk stråling er et overflatefenomen. Videre er emissiviteten relatert til materialets reflektans ρ ved likningen, $\epsilon=1-\rho$, for et gjennomsiktig materiale. Det foregående forklarer hvorfor knapper på klær er synlig på et termografi og hvorfor et blankpolert metall med speilvirkning tilsvarer en $\epsilon=0.1$, mens det samme oksiderte eller malte metallet er karakterisert ved $\epsilon=0.9$. Dette er kanskje mer forståelig hvis man tenker seg at objektoppvarmingen foregår i annet frekvensområde enn 3-12 μm .



Figur 7.2. Viser utviklet termisk stråling for to objekter med henholdsvis, $T=300\text{K}$, og $T=800\text{K}$. Termisk strålingsenergi relativt til strålingsenergien for et sort legeme ved samme temperatur og med samme overflateareal, langs y-aksen. Bølgelengde langs x-aksen. Med sort legeme menes et objekt med maksimal utstråling av energi, ref. (14).

7.2 Valg av bølgelengdeområde for termisk deteksjon

Våre egne sanseintrykk av termiske fenomener og erfaringer med varmestråling er svært begrenset, og vi er derfor avhengig av modeller og målinger for å kunne danne oss et bilde av dette usynlige som omgir oss. I det foregående var vi kanskje noe raske med å bestemme området for deteksjon av termisk stråling. Vi antydte at kortbølget infrarød deteksjon egnet seg for varme mål og langbølget infrarød deteksjon for 'kjølige' marine og landbaserte mål. En tommelfingerregel som ikke er verken helt feil eller helt riktig. Vi må erkjenne at valg av bølgelengdeområde for deteksjon av termisk stråling er en sammensatt problemstilling som blant annet påvirkes av bakgrunnstråling og atmosfærens transmisjonsegenskaper. Naturlige kilder for stråling er sol, land og sjø. Bakgrunnen til objektene i scenen dannes av atmosfæren med eller uten skyer (og land og sjø). Emittert, spredt og reflektert stråling gjør bakgrunnen og objektene til en kompleks scene for observasjon og måling. I litteraturen finner vi referert til modeller og målinger som viser at en bakgrunn ved vanlig temperatur i det langbølgeinfrarøde, 8 μ til 12 μ området, stråler sterkere enn i 3 μ til 5 μ området. Strålingskontrasten - netto strålingen

mellom antatte mål og bakgrunn ved gitt temperatur- derimot, er dobbelt så stor i 3μ til 5μ området.

Vi lar bakgrunnstråling og bakgrunnkontrastproblematikken hvile, og går videre med transmisjonsmediet. Atmosfærens innhold av karbondioksyd og vanndamp medfører bølgelengdebånd hvor transmisjonen er sterkt nedsatt. Mellom disse absorpsjonsbåndene finner vi atmosfæriske vinduer, 3μ til 5μ - og 8μ til 12μ området, med god transmisjon. Men vanndampinnholdet i luften varierer innenfor disse områdene og kan medføre betydelig dempning, mest i 8μ til 12μ området. Karbondioksydinnholdet gir et markert og stabilt absorpsjonsbånd ved $4,3\mu$, det vil si innenfor 3μ til 5μ området. Motivasjonen for å utvikle detektorer for avgrensede bølgelengdeområder i det infrarøde spektrumet henger nøye sammen med atmosfærens absorpsjons- og transmisjonsegenskaper. Teknologien som er utviklet gir oss nattsyn, men kan også benyttes om dagen. I nedre del av 3μ til 5μ området vil virkningen av reflektert sollys kunne merkes - noe vi vanligvis ønsker å filtrere bort.

Sol og klar himmel en tidlig vintermorgen gir svært gode forutsetninger for deteksjon av objekter i skjul av optisk skygge som følge av optimale transmisjonsforhold og kontraster i det infrarøde bølgeområdet. I det optiske området overeksponeres vi av refleksjonskontrast, det vil si sol på snø i kontrast med skygge. Men været skifter. Tåke og snø vil endre siktforholdene i scenen vår. Sensortechnologien – optisk, nærinfrarød eller termisk, vil i ulik grad være eksponert for varierende siktforhold.

Spredningen i atmosfæren er avhengig av de spredende partiklenes størrelse i forhold til bølgelengden. Partikkelstørrelser tilnærmet lik bølgelengden gir mest spredning. Tåke som i hovedsak består av $1-10\mu$ store vannpartikler gir sterk spredning i hele det infrarøde bølgelengdeområdet. Regn derimot har $250-3000\mu$ store partikler og har liten eller ingen innvirkning som spreder for det infrarøde bølgelengdeområdet. Snøvær skiller klart på hvilket bølgelengdeområde som egner seg og gir dårligere transmittans i 8μ til 12μ området enn i 3μ til 5μ området

Spredning og dempning i atmosfæren er naturgitte fenomener som det ikke kan gjøres noe med, og er bestemmende for strålingsmengden og strålingskontrasten som er tilgjengelig for våre varmesøkende og/eller billeddannende termiske detektorer. Målet er å gjøre detektorens egenstøy så liten som mulig slik at signal-/støyforholdet til detektoren kun begrenses av den naturgitte fotonstøyen. Oppnås dette er signal-/støyforholdet tilnærmet gitt av strålingskontrasten i scenen, noe som favoriserer 3μ til 5μ området. På den andre siden, er bakgrunnen kald og målene kalde vil den mottatte fotonfluksen i 3μ til 5μ området bli så liten at andre støymekanismer enn de som er knyttet til fotonfluksen kunne dominere, og signalet vil kunne drukne i støy. 8μ til 12μ området med sin sterkere absolutte stråling ville da kunne være det riktige valg. Men høy fotonfluks vil ikke kunne nyttiggjøres uten tilstrekkelig oppsamlingskapasitet for 'fotoelektroner'. Det ligger et utviklingspotensiale i å øke denne.

Kapittelets problemstilling er valg av bølgelengdeområde for deteksjon av termisk stråling, se forøvrig (4) eller (17) for ytterligere fordypning. Som det forhåpentligvis har fremgått av gjennomgåelsen, finnes det ikke et entydig svar på spørsmålet; om eller når vi bør benytte 3μ til 5μ - eller 8μ til 12μ området, kun enkle retningslinjer.

7.3 Kjølt detektorteknologi

Den maksimale rekkevidden til en termisk billedetektor er opptil 10x lengre enn siktlengden til en optisk sensor. Selvsagt under forutsetning av at det er tilstrekkelig med kontrast i scenen - refleksjonskontrast for den optiske sensoren og strålingskontrast for den termiske. Flybårne FLIR⁷⁹ kamera som utrustningen i F-117, kan sannsynligvis 'se' 40 km. Satellitt utrustninger for IR deteksjon kan se flere hundre kilometer. Hvorfor er dagslys kamera fremdeles i bruk? Grunnen er sannsynligvis at termiske billeddannende kamera er omtrent 5ganger større, tyngre og dyrere enn tilsvarende elektrooptiske kamera. Dette ble skrevet på 90-tallet i (14), og om situasjonen er den samme skal vi forsøke å klargjøre i kapittelet som følger.

7.3.1 Fotodeteksjon

De fleste infrarøde detektorer faller i en av to generelle klasser enten i gruppen for termiske detektorer eller i gruppen for fotodetektorer.

I fotodetektoren eksiterer innkommende stråling elektroner som medfører endringer i detektormaterialets (elektroniske) tilstand. I termiske detektorer vil strålingsenergien som absorberes gjøre at temperaturen stiger i deteksjonselementet. Denne økningen i temperatur vil medføre endringer i temperaturavhengige parametere for deteksjonsmaterialet. Monitorer vi på en av disse endringene vil det være mulig å kvantifisere innkommende stråling. Målemetodene kaller vi henholdsvis direkte og indirekte fotodeteksjon.

7.3.2 Fra fotoledere til avalanche dioder.

Fotodetektorer skilles grovt i fotoledere, fotoemittere og fotodioder. Bruksområde og aktualitet er ulik innen gruppen. Utviklingslinjen og generasjonsskiftene mellom detektortypene er presentert nedenfor.

Førstegenerasjons detektorer med fotoledere i lineære rekker, er fortsatt i bruk (om noe modifisert sammenlignet med 'common module'-teknologien⁸⁰). Ulempen med denne teknologien er lav impedans som gir stor bias strøm (mA) og vanskeliggjør utlesningselektronikken. Med 1. generasjon regnes både enradete skannede arrayer og arrayer med flere elementer. TDI, 'time delay integration', er en mye brukt summeringsteknikk for disse linjevise flerelement detektorene. Dessverre kan ikke fotoledere brukes i store arrayer.

Med andre generasjons detektorer forstår vi systemer med stirrende fokalplan arrayer (FPA) bestående av fotovoltaiske todimensjonale array. Det vil si fotodiodebasert teknologi som produseres i tusentall årlig. Fordelen med denne teknologien er høy impedans som gir lav mørkestrøm(nA) og enkel utlesningselektronikk.

Med tredje generasjons detektorer forstår vi avbildende systemer med flerfunksjonsdetektorer for deteksjon av to eller flere farger, avalanche fotodioder, store array (1000x1000) og økt fokalplansignalprosessering, (videre fordykning se (21)). Militær⁸¹ målsetting er å realisere avbildende utstyr med termisk deteksjon i flere fargebånd, høy ytelse og stirrende detektorer med kompakt optikk. Mellombølgeinfrarød deteksjon for identifikasjon på lang avstand og

⁷⁹ FLIR ~ Forward Looking Infra Red. Stirrende termisk sensor med forbedret signal/støy-forhold sammenlignet med linjeskannende sensor.

⁸⁰ 'common module' et forsøk på standardisering av IR teknologi på 1970-tallet.

⁸¹ Avansert IR-FPA teknologiutvikling er militært drevet.

langbølgeinfrarød deteksjon for raskt søk samt sikt gjennom støv/røyk, det vil si deteksjon i begge bånd samtidig. Tredje generasjons detektorer er på demonstrasjonsplanet, jamfør (15) og (56), (to-farget QWIP, og to-farget HgCdTe FPA sensorer).

7.3.3 Stirrende sensorer erstatter bevegelige komponenter

Første generasjons termisk avbildende utstyr med en eller flere detektorrekker benytter todimensjonal optisk- og mekanisk skanning for avlesning av scenen. Målet er et konvergerende system som avbilder oppløsningselementer av objektoverflaten på den infrarøde detektoren. Detektoren produserer et svakt elektrisk signal som forsterkes til å kunne drive et display som elektronisk skannes synkront med detektorskanningen. Det er vanskelig å gjøre den optiske og mekaniske skannemekanismen robust. Derfor er det en klar evolusjon mot elektronisk skanning, noe som reduserer vekt og antall bevegelige kameraelementer og gir mer robuste systemer, ifølge (25), (47), og (56). Mitsubishi var de første til å realisere et stirrende array ved å benytte et 512x512 PtSi (platinum-silicide) -element integrert med deres silisumbaserte CCD utlesningselektronikk i en monolittisk IC-krets, ifølge (16). Vi snakker her om 80-talls spissteknologi med anvendelse innover på 90-tallet. Kappløpet mot høyoppløselig termisk avbildning realisert ved hjelp av infrarøde og halvlederbaserte detektorer, har gitt et bredt utvalg av mer eller mindre vellykkede teknikker og materialer.

7.3.4 Fremtidig langbølget infrarød detektorteknologi

I det langbølgeinfrarøde området, 8 μ til 12 μ , eksisterer det i dag to konkurrerende teknologier – henholdsvis, HgCdTe, kvikksølv-kadmium-tellurid, og GaAs/AlGaAs-kvantebrønndetektorer (QWIP⁸²). HgCdTe har som enkelt element høyere følsomhet og deteksjonsegenskaper enn en kvantebrønndetektor, det samme gjelder mørkestrømnivået som er vesentlig høyere i QWIP enn i HgCdTe-detektorelementet, noe som krever kraftig nedkjøling (T=60K) av QWIP mot (T=80K) for HgCdTe. Dette gir et større effektforbruk i QWIP-baserte kamera. Til gjengjeld har QWIP høyere romlig uniformitet enn HgCdTe, noe som blant annet henger sammen med at QWIP-array er produksjonsmessig mer kontrollerbare og har større produksjonsutbytte. Dette gjør at QWIP-detektorer er tilgjengelig til lavere pris enn HgCdTe-detektorer. Det lages i dag kameraer med 640x480 elementers stirrende QWIP-array, mens tilsvarende HgCdTe-array foreløpig bare er demonstrert. Kameraer med 256x256 elementer HgCdTe-array med pitch 40 μ m er i produksjon i følge (16).

Stirrende fokalplan produseres i det alt vesentlige med fotodiode teknologi. Stirrende fokalplan array til militært taktisk bruk i langbølget område har vært teknologisk ledende gjennom 80- og 90-tallet. I dag rapporteres det at det er halvlederbasert fotodiodeteknologi for det mellombølgeinfrarøde området som regnes for å være lengst fremme, ref. (56). Det er generelt vanskelig å sammenstille detektorelementene med utlesningselektronikken. Spesielt vanskelig er det å produsere store HgCdTe-diodearray for det langbølgeinfrarøde området som følge av termisk-mekaniske spenningsvariasjoner, variasjoner som medfører indusert 1/f-støy. Løsninger for sammenføyning av detektor- og utlesningskretser, basert på balansert kompositt strukturer er under utvikling for å redusere mekaniske spenninger i store hybride array. Det vil si forbedring av dagens eksisterende 'loop-hole'- og 'indium-bump'-teknikker. Se kapittel (7.4) for sammenføyning av detektor- og utlesningskretser, og silikon gitterstruktur (lattice) som ikke

⁸² QWIP ~ Quantum Well Infrared Photodetector.

korresponderer med materialer med smalt båndgap.

QWIP-stirrende fokalplan er basert på tynne materiallag som danner kvantum brønner. Hvert lag er bare noen molekyler tykke. Det dannes energi i del bånd (intra-bånd) der kvantum effekter responderer på innkommende stråling. QWIP-stirrende fokalplan blir produsert ved hjelp av MBE⁸³, som er en relativt billig prosess. Vi gjenntar at dette gir relativt høyt produksjonsutbytte, uniforme detektor array med lavt mekanisk-termisk spenningsnivå selv i store array og muliggjør flerspektrale anvendelser. Ulemper er kravet til kjøling ($T \leq 60\text{K}$) og relativt lav kvantum effektivitet. Cryogene kjølere som opererer ved temperatur til flytende nitrogen ($T=77\text{K}$) er under utvikling for QWIP-anvendelser. Lav kvantum effekt antas å bli forbedret ved metodeutvikling samt at flerspektral undertrykking kan realiseres for å forbedre deteksjon på lengre distanser ifølge (16).

7.3.5 Fremtidig mellombølgeinfrarød detektorteknologi

InSb, indium-antimonid, med respons opp til bølgelengden 5μ , har vært i bruk siden 50-tallet. Stirrende fokalplan med dette materialet har utviklet seg hurtig gjennom 1990-årene og har i dag fortrenget PtSi, platinum-silicide, som detektormateriale i stirrende arrayer for det mellombølgeinfrarøde området, ifølge (4) og (11). Array med 640×512 InSb-elementer er i dag kommersielt tilgjengelig. InSb eller PtSi kjøles til $T=77\text{K}$ (-196°C). Sterk avkjøling hindrer narcissisme⁸⁴ i kvantum deteksjon og kan realiseres enten ved Peltier elementer (termoelektrisk) for nedkjøling til -80°C eller med Joule-Thompson ekspansjon (komprimert nitrogen) eller Stirling (flytende helium) kjøler for å nå ned til 77K . I kortbølge- og mellombølgeinfrarøde området (1μ til 5μ), antar man at InSb (indium antimonid), HgCdTe (kvikksølv-kadmium-tellurid) og kvantebrønn fotodetektorer (QWIP) vil være de dominerende detektorteknologiene utover i dette tiåret. Stirrende InSb-array og HgCdTe-array med 640×480 -elementer er i produksjon. Det arbeides med å realisere stirrende array med 1024×1024 -elementer der detektor til detektor avstanden er nede i $18\mu\text{m}$. Ledende aktører i detektormarkedet (deriblant Boeing) har intensjoner om å utvikle mellombølge HgCdTe-fokalplanarray med 2048×2048 elementer og $10\mu\text{m}$ detektor til detektor avstand i løpet av 2005-2007, noe som tilsvarer dagens høyoppløselige TV-kamera, HDTV se (3), og Boeings fremtidige IR-sensorer, se (16). I USA evaluerer hæren fortløpende status for stirrende array og QWIP-teknologi for å erstatte eksisterende 1. generasjons skannende HgCdTe-teknologi. I øyeblikket er status den at de sistnevnte systemer fremdeles gir høyere yteevne. Det er imidlertid en betydelig utvikling innen QWIP-produksjonsteknologien, ifølge (4).

7.4 Ukjølt detektorteknologi

Det eksisterer to hovedtyper ukjølte fokalplanarrayer; mikrobolometeret og den ferroelektriske detektor. De operer begge i hovedsak i $8\text{--}12\mu\text{m}$ bølgelengdeområdet.

Mikrobolometeret ble lansert av Honeywell i 1992 og den ferroelektriske detektoren ble introdusert av Texas Instrument samme år.

⁸³ Molecular Beam Epitaxy (MBE) er groing av en krystallinsk tynn film på et substrat. Epitaksi betyr 'langs samme akse' - atomene ordner seg etter substratet. Prosessvariablene og grobetingelsene er enkle og er gitt ved ankomst rate og substrattemperatur.

⁸⁴ Narcissisme til en halvledende kvantum detektor er termisk induert ladning i form av uønsket mørkestrøm.

Det legges ned betydelig F&U midler, både offentlig og i privat regi, i videreutvikling av denne teknologien. I første omgang søker en å redusere element-størrelsen, ned mot cirka 25 μm , og beholde samme NETD⁸⁵, (mikrobolometre med 100mK ved f-nummer 1 er tilgjengelig). I neste omgang vil en redusere NETD ifølge (4)

Ukjølte termiske detektorer som baserer seg på indirekte deteksjon, og monitorering av deteksjonselementtemperatur i form av absorbert strålingsenergi, er generelt trege og mindre følsomme. Disse er begrenset til rekkevidder på 1 km ifølge (14) .

For å være i stand til å levere bilder med bedre kontrast (spesielt i disig vær), kan EO kameraet skiftes ut eller suppleres med et nærinfrarødt kamera (ukjølt eller kjølt) som er mindre eksponert for Rayleigh spredning (proporsjonalt med $1/\lambda^4$) til sollys. Rayleigh spredning eller lysspredning er spesielt ugunstig ved observasjon av ultrafiolett og blått lys.

De fleste utlesningskretser (multipleksere) produseres i silikon med gitterstruktur (lattice) som ikke korresponderer med materialer med smalt båndgap. Dette hindrer integrasjon i ett plan – monolittisk integrasjon. Kjølte kvantumsdetektorer, indiumantimonid- og kvikksølv-kadmium-tellurid detektorer er ikke compatible med silisium og krever hybrid integrasjon, med påfølgende problemer ved kjøling mellom detektor og utlesningskrets som følge av ulike termisk ekspansjonskoeffisienter (dels som følge av 'indium-bump'- eller 'loop-hole'- sammenføyningen). Den samme gitterstrukturproblematikken oppstår ved bruk av mikrobolometer og ferroelektriske detektorer bortsett fra at de sistnevnte detektorene fungerer ved romtemperatur og vanskelighetene med termisk ekspansjon er eliminert.

Imidlertid er monolittiske versjoner av ferroelektriske detektorer under utvikling både i USA og Storbritannia. Det ferroelektriske materialet påføres som en tynn film direkte på en mikrostruktur av silisium. Denne inneholder utlesningselektronikken i integrert form. Dette skulle kunne bringe ytelsen til denne type kameraer ned mot en NETD på 10-15 mK ved lavt f-nummer for optikken, ifølge (4).

IMEC (Leuven) utvikler mikrobolometre med polySiGe⁸⁶ materiale brukt som termistorer med CMOS⁸⁷-kompatible billedsensorer, ifølge (14).

Indigo Systems (Santa Barbara, CA) introduserte mikrobolometer kameraet Alpha for drøye to år siden. Nå er oppfølgeren Omega i markedet. Effektforbruket er redusert med nesten 30% (fra 1.5W til 1.1W), vekt med 45% (fra 186g til 102g), volum med 60% (fra 8.7in³ til 3.5 in³), og temperaturfølsomheten (NETD ved f/1.6), er forbedret med nesten 20%, (<100mK til <85mK). Alpha og Omega kameraseriene (320x240 InGaAs for NIR 900-1700nm, 160x120 $\mu\text{bolometer}$ og 320x240 $\mu\text{bolometer}$ for 7.5-13.5 μ) er presentert i (57). Kameraene er blant annet aktuelle sensorer for miniatyr UAVer, se for øvrig (58).

⁸⁵ NETD. Nominal effective temperature difference. Temperaturdifferansen tilstrekkelig for deteksjon av militære objekter mot bakgrunn er på 1-10°. Klassifisering og identifikasjon av det aktuelle objektet krever sannsynligvis bedre temperaturopløsning (, NETD~100mK), (4).

⁸⁶ Poly SiGe er et relativt nytt materiale brukt som termiske motstander (bolometere). Elektriske, termiske, mekaniske og optiske egenskaper er grundig gjennomgått i læreboken, (3).

⁸⁷ CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor image sensor) er en billeddannende sensortechnologi uten seriell ladningsforflytning, og konverterer fotonladning til et direkte digitalt adresserbart format.

7.5 Optiske systemer for termisk avbildning

I dette kapittelet ser vi spesielt på anvendelser for det infrarøde bølgelengdeområdet. Optiske systemer deles i stort opp i henholdsvis linsesystemer, refraksjonsoptikk, og speilsystemer, refleksjonsoptikk, samt kombinasjonen speil og linser. Ulemper ved linseoptikk for infrarødt område er pris, vekt og dispersjon. Pris for optikken kan være drivende for totalprisen til et termisk kamera. Vekt er kritisk i mange flybårne applikasjoner. Dispersjon, $n=n(\lambda)$, fremkommer ved at fokallavstanden varierer med brytningsindeksen. Det vil si at lysspekterets brytning vil være forskjellig ved ulike bølgelengder.

7.5.1 Diffraksjon og romlig oppløsning

Generelt representeres lysgangen i geometrisk optikk forenklet og idealisert som rette linjer vinkelrett på parallelle bølgefronter, og vanligvis neglisjerer man diffraksjonseffekter. Lysgang i geometrisk optikk, se (26).

Vi har tidligere sett på forhold som må taes i betraktning når bølgelengdeområdet for et termisk system skal velges (som transmisjon og spredning i atmosfæren). Det er enda et forhold som må taes i betraktning når bølgelengdeområdet skal velges, og det er optikkens størrelse. På grunn av diffraksjon vil et uendelig fjernt punktmål bli avbildet som en endelig utstrakt skive selv om optikken er fri for avbildningsfeil - et naturgitt fenomen. Dette innvirker på infrarødkameraets romlige oppløsningsevne. Imidlertid er denne skivens diameter proporsjonal med bølgelengden. Det gjør virkningen av diffraksjon mindre i 3μ til 5μ -området. Optikkens 'lysstyrke' spiller også inn idet skivens diameter også er proporsjonal med f-nummeret ($\#f$), forklaring til blendetall se appendiks (A.4). Ved å holde f-nummeret lavt, kan et 8μ til 12μ -objektiv gi like liten diffraksjon som et 3μ til 5μ -objektiv, men det vil på grunn av lavt f-nummer bli mye større og tyngre, (4).

7.5.2 Optiske materialer

Ideelt sett ønsker vi en kompakt og robust optikk som samler strålingsenergien uten transmisjonstap. Godhetstall beregnet for optiske materialer gir sinkbaserte materialer som ZnSe og ZnS kvalitativt god plassering ved bruk i mellombølge infrarødoptikk, noe dårligere for Germanium som tradisjonelt er velprøvd og mye brukt. Alle disse kandidatene kommer også godt ut i 8μ til 12μ -området. Her introduseres også Gallium-Arsenid (GaAs) som er et relativt nytt materiale brukt som optisk element. Kurver viser at transmisjonsegenskapene for GaAs er høye (54%) og svært stabile for ulike temperaturer (25°C til 400°C) over hele det aktuelle bølgelengdeområdet. Tidligere var dette materialet bare tilgjengelig i 2 toms- og 3 toms krystallstrukturer. I dag klærer man å fremstille 6 toms krystaller i GaAs (Gallium-Arsenid) som følge av forbedret groing. Dette gir muligheter for større optikk. På materialrankinglistene for infrarødoptiske materialer kommer GaAs best ut sammenlignet med Ge, ZnS og ZnSe (i 8μ til 12μ -området). Dette gjelder både til bruk i domvinduer og optikk. Germanium (Ge) taper spesielt på rankingen for domvindu⁸⁸-materialer som følge av høy densitet og temperaturavhengig diffraksjonsindeks. Germanium (Ge) er likevel et fullgodt materiale ved omgivelsestemperatur ($T=300\text{K}$) hvor transmisjonskurver viser at Ge har en fordelaktig flat kurve (45% transmisjon). Brytningsindeksen er 4, men med lite internt tap. Tabeller, kurver og ranking resultater for optiske materialer se (25).

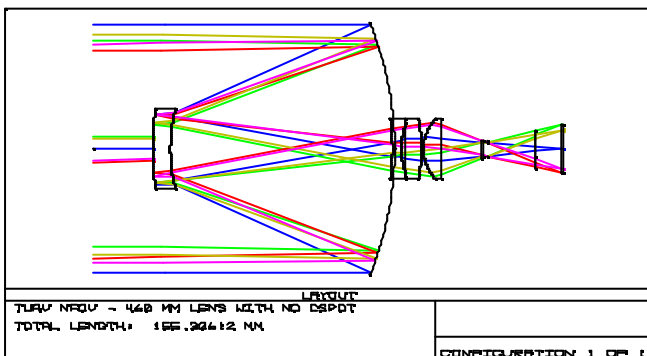
⁸⁸ Dom- eller radomvindu. Beskyttende nesekonvindu med gode optiske og/eller termiske transmisjonsegenskaper.

7.5.3 Anvendelser og eksempler

Ved utforming av optikk generelt og infrarødoptikk spesielt, ender man opp med mange sfæriske flater for å få best mulig lysgang til en overkommelig pris. Dette introduserer refleksjonstap. Transmisjonstapet kan reduseres ved antirefleksbelegg, (AR). Noe som er dyrt. Benytter man for eksempel en triplett med 6 flater samt øvrig kompensasjonsoptikk, vil man totalt kunne få 20 flater som skal AR-belegges. 'Fotonenes veier er uransakelige.' Det er uansett vanskelig å eliminere strølys.

Speil er mye brukt. Og diamantdreide aluminiumsflater gir god overflate med holdbarhet hvis de påføres belegg for beskyttelse mot oksidering. Fordelene med speilsystemer er lav vekt, refleksjon som er uavhengig av bølgelengde og billige materialer (aluminium). Redusert vekt gjør at bevegelige strukturer krever mindre effekt og man unngår oppvarming av detektorens omgivelser.

Kombinasjonsoptikk benyttes for å korrigere for sfæriske avbildningsfeil (abberasjon). Abberasjon er en sekkebetegnelse for en rekke optiske avbildningsfeil. Monokromatisk-, polykromatisk-, tredjeordens-, høyere ordens abberasjon gitt ved coma (asymmetriske punkt kilder), astigmatisme (skjeve overflater som skjeve hornhinner), ikke-lineær felt avbøyning osv. Kombinasjonsoptikk har også den fordelen at den forkorter stråleveien og gjør optikken mer kompakt. Domvinduet kan også benyttes som korreksjonselement.



Figur 7.3. Kombinasjonsoptikk.

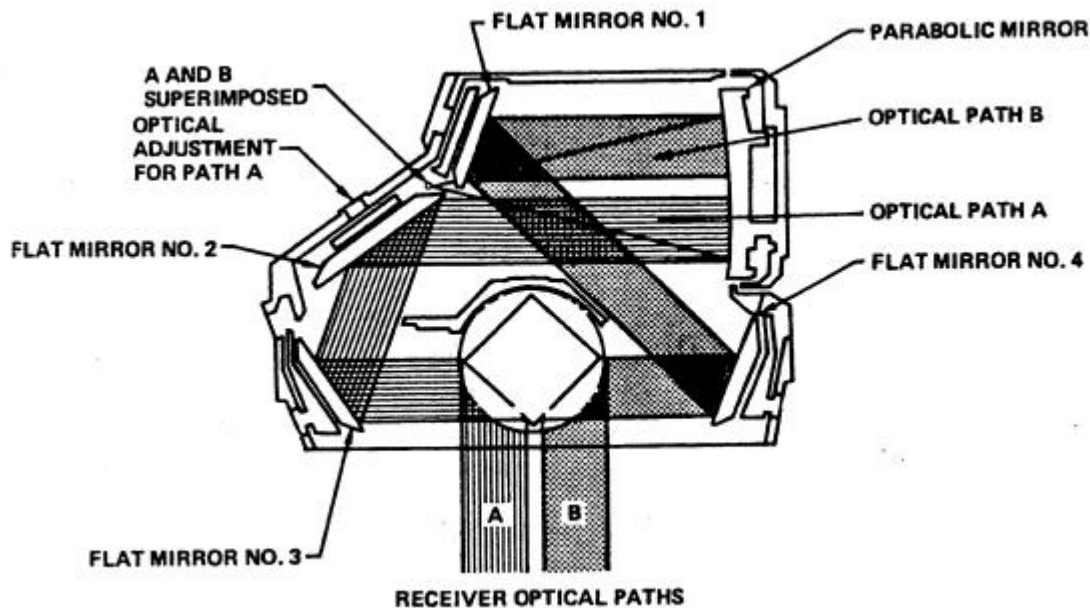
Figur 7.3 viser et speilsystem kombinert med linser for blant annet å korrigere sfærisk abberasjon og forkorte stråleveien. Vi ser et parabolispeil og en konkav linse samt kompensasjonsoptikk. Strålegangen ender i fokuspunkt for henholdsvis rødt, grønt og blått fargebånd. Optikken er utviklet av Wescam for et stabilisert rekognoseringsystem til TUAV⁸⁹-prosjektet, (27). Dispersjon, $n=n(\lambda)$, fremkommer ved at fokalavstanden varierer med brytningsindeksen, det vil si at lysspekterets brytning er forskjellig ved ulike bølgelengder i objektivet.

De første IR-linjeskannere benyttet øksehode design, som følge av den kilelignende formen på skann-speilene. De enkleste besto av store enkeltsidespeil, skråstilt 45° grader på skaftet. Denne utformingen er fortsatt i bruk i det vitenskapelige miljøet til jordobservasjon og metrologiske studier. Men militære behov for høyere hastighet-/høyde forhold, ledet til utviklingen av splitt

⁸⁹ Tactical Unmanned Aerial Vehicle (TUAV) NFOV IR optikk Wescam Patent #5907433, 460 millimeter linse med lengde 155,30612 millimeter. (US Army kontrakt februar1999)

aperture skannere. En versjon med et firesidet bevegelig polygonespeil er vist i **Error! Reference source not found.** nedenfor. Det skannende prismet vender to av sidene mot innkommende stråler og i midtposisjon (nadir) er aperturen identisk for begge speilsidene. Etter hvert som det roterende speilet vendes bort fra midtstilling, så strekker og krymper halvbyldeprosjeksjonen seg, mens tversover-aperturen (synsfeltet) holder seg rimelig konstant over den brede skannvinkelen. Et roterende 4-sidersprisme tillater ikke å bli benyttet for 180°-skann. Et triangulært speil kan derimot benyttes til 180°-graderskann som følge av at de utvendige foldespeilene kan posisjoneres høyere for å håndtere innkommende og reflektert strålegang. Økt følsomhet (reduert NETD), og høyere MTF⁹⁰, ved høyere romlig frekvens, redusert IFOV, er forbedringer som er etterspurt i små, robuste og prismodererte IRLS-pakker.

Fremtidens IRLS-design utfordres av stirrende kamera teknologi, men er fortsatt konkurransedyktig som følge av forbedret rekkesensorteknologi, og nye optiske materialer. Benytter man store array og tillater litt slakk på detektiviteten, D^* , holdes prisen på sensorpakken nede. Man kan også oppnå forbedringer ved å øke belysningstiden til hvert sensorelement. Redusert skannhastighet øker belysningstiden og objekter med lavere temperaturdifferens (NETD i forhold til bakgrunn), kan detekteres. Størrelsen på array forutsettes ikke å overskride optikkens linsediameter. Benytter man 3-5 μm båndet i stedet for 8-14 μm kan man skanne med redusert hastighet. Er det behov for økt ytelse ved lav høyde og svært skrått seende vinkler, eller ved rekognosering på store høyder med krav til rekkevidde, bør oppdraget suppleres med sideseende⁹¹ IR-skanner. Hastighet-/høyde forholdet er generelt svært lavt i horisonten. Mer om IRLS-design se (28) og (59).



Figur 7.4 Optikk i ATARS infrarøddinjeskanner utviklet av Loral Infrared & Imaging Systems for Advanced Tactical Air Reconnaissance System. ATARS infrarøddinjeskanner støtter 140° synsfelt i vidvinkel modus, har høy termisk oppløsning i 8-14 μm båndet og er i stand til å samle et kontinuerlig bilde i hastighet/høyde-forhold opptil 5 radianer per sekund. Tilsvarende v/h-forhold med flyhøyde på 200ft og hastighet på 1Mach, ref. (61).

⁹⁰ MTF. Modular Transfer Function.

⁹¹ Foreslått IRLS er nedoverseende.

8 KONLUSJON

Spesifikasjon av UAV-system for norsk anskaffelse krever teknologi-oversikt. Tilrettelegging for planlagt midtlivsoppdatering av UAV-systemet krever innsikt i fremtidens teknologiske muligheter. Dokumentet gir på sensorsiden grunnlag for anskaffelses-spesifikasjon og for planlagt midtlivsoppdatering.

Pr i dag er rekognoseringsprodukter fra elektrooptiske sensorer foretrukket av billedtolkere. Avbildning med elektrooptiske sensorer gir meget god oppløsning forutsatt at UAV-plattformen observerer under skydekket. For å støtte 24-timers operasjoner under skydekket, kreves i tillegg termiske sensorer. Flyr man i skydekket har EO og IR begrenset eller redusert sikt for observerende UAV. For å være i stand til å levere bilder med bedre kontrast (spesielt i disig vær, under skydekket), kan EO kameraet skiftes ut eller suppleres med et nærinfrarødt kamera. Termiske kamera har noe bedre sikt (enn EO) under varierende værforhold, men likevel begrenset sikt gjennom naturlige og menneskeskapt hindringer (som tåke, regn eller som støv og røyk).

En avbildende mikrobølgebasert syntetisk apertureradar (SAR) er en viktig sensorteknologi. En avbildende radar (SAR) kan benyttes både om dagen og om natten fordi den besørger egen belysning. En avbildende radar (SAR) har allværskapasitet fordi radiobølger forplanter seg gjennom skyer og regn med liten eller ingen demping. Ulempen med avbildende radar (SAR) er tung signalbehandling. I øyeblikket sørger UAV-systemer med avbildende radar for SAR-prosessering i bakkestasjonen, noe som krever bredbåndstransmisjon med stor kapasitet.

Figur 8.1 oppsummerer egenskaper ved flybårne avbildende sensorer.

I henhold til dette bør man ha en UAV som flyr høyt, har stor dekning, ser langt (egnet som rele) og har stor nyttelast-kapasitet med avbildende radar (SAR), samtidig med at en eller flere hurtig- og lavtflygende-UAV flyr under skyene og gir gode EO-/IR-bilder.

Sensor type	Vær		Oppløsning		Vekt & kost
	Skydekke	Regn	Oppløsning	Kontrast	
µbølge-SAR	●	●	●	●	○
langbølge-SAR	●	●	○	○	○
termisk stirrende sensor, FLIR	○	○	○	○	○
laser radar, LIDAR	○	○	○	○	○
spot- og vidvinkel EO/TV	○	○	○	○	○
passiv millimeterbølge sensor	○	○	○	○	○

Note

● meget god
○ gjennomsnitt

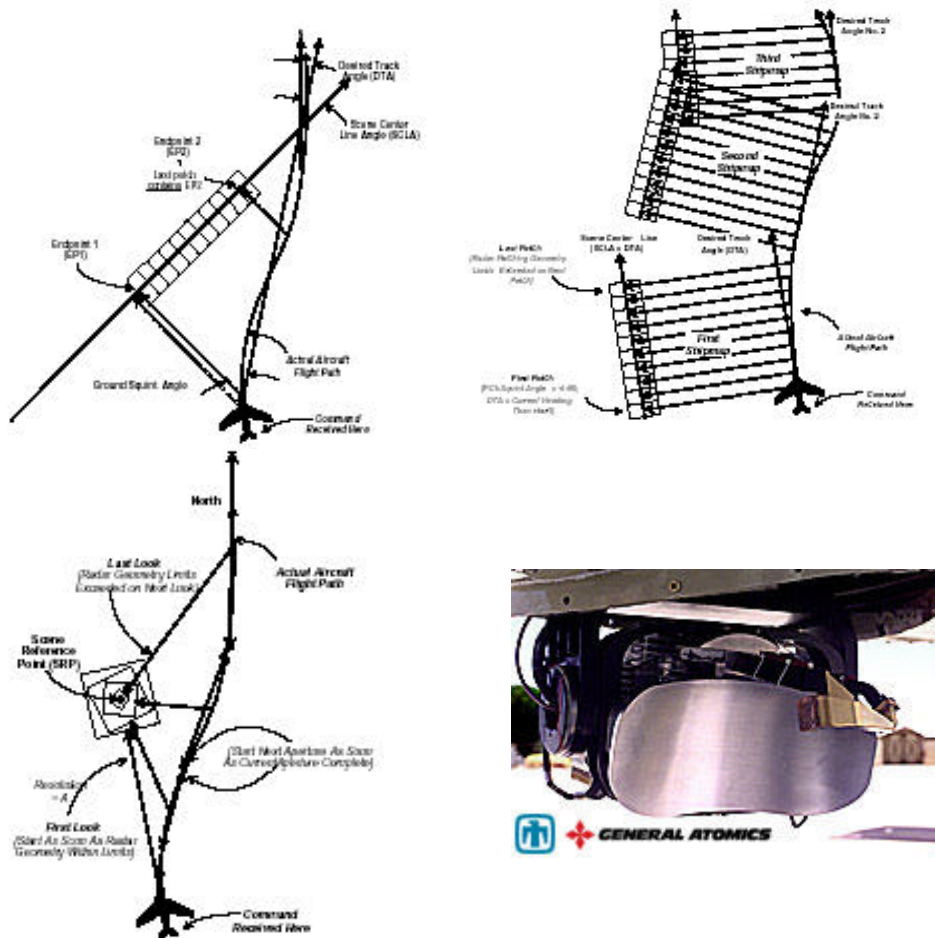
○ god
○ dårlig

Figur 8.1. Viser egenskaper for luftbårne avbildende sensorer med hensyn på vær, ytelse og økonomi. Forenklet figur fra (16). Oppløsning og dekning antas å være komplementære størrelser. (Stor dekning gir moderat eller liten oppløsning og omvendt.) En X-bånd eller Ku-bånd, **µ**bølge-SAR er antatt å være den best egnede målobserverende sensor for fremtidig UAV-plattform. De øvrige sensorene er i rangert orden, langbølget-SAR, det vil si bakkepenetrerende SAR, stirrende infrarøde sensorer (FLIR), laser radar (LIDAR) samt optiske sensorer (EO/TV) og passive millimeterbølge(MMW) sensorer.

Det er spådd at fremtidens sensornyttelast vil dekke det spektrale området fra VHF-frekvenser til synlige bølgelengder og inneholde informasjon for flerdimensjonal signaturanalyse.

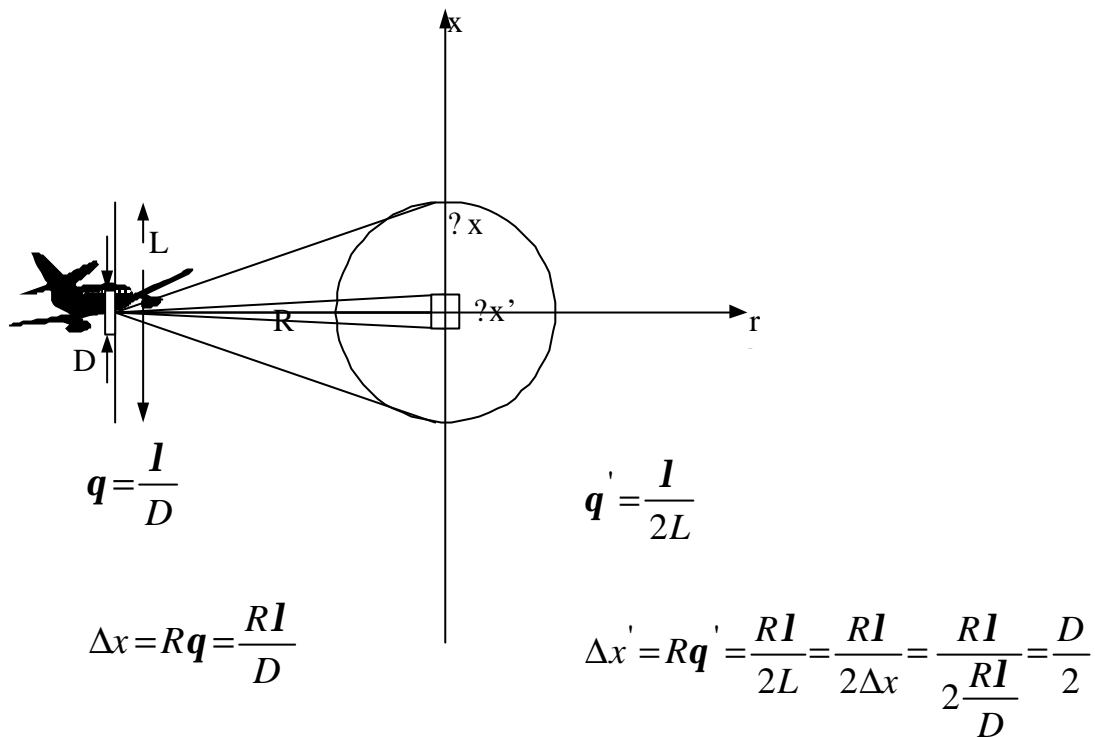
APPENDIKS

A.1 SAR prinsippet



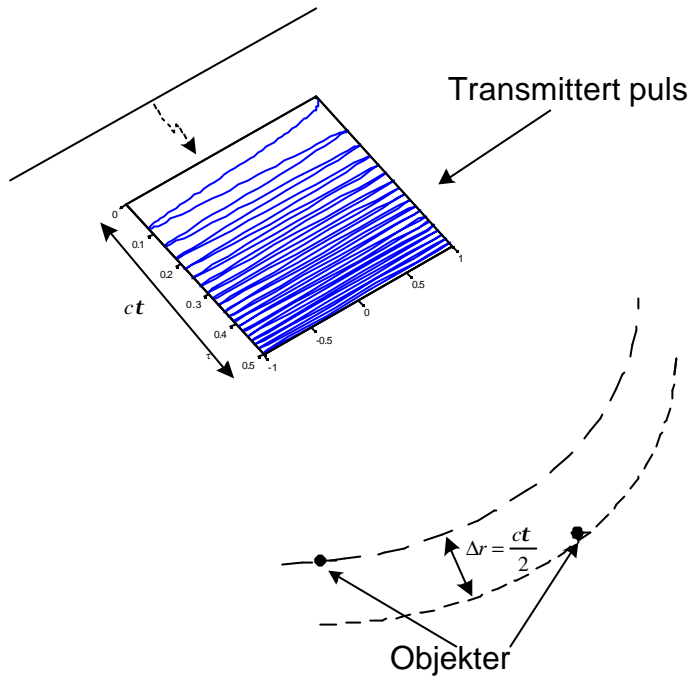
Figur 8.2 Viser geo-referert 'stripmap'-modus, (a), og 'transit stripmap'-modus eller 'scan'-modus, (b,) samt 'spotlight' modus, (c). LynxSAR antennen er avbildet nederst til høyre, (d).

La oss anta en plattform med et radarsystem som forflyttes langs en lineær trajektor i asimut som vist i Figur 8.3. Vi undersøker systemets evne til å skille mellom to reflekterer i asimutretningen. To primær-reflektorer kan skilles fra hverandre bare hvis de ikke er innenfor radarstrålen på samme tid. Asimutoppløsningen, eller asimutoppløsningscellen, Δx , er relatert til antennestrålebredden, $\lambda/D \sim \theta$, ved uttrykket, $\Delta x = R\theta = R\lambda/D$, hvor R , er skråavstanden og D , er den 'effektive' antennestørrelsen i asimut retningen (, det vil si i x-retningen i Figur 8.3). Med sann radaraperture vil Δx , være i størrelsesorden kilometer, innsatt LynxSAR-data. Dette er ikke akseptabelt for de fleste applikasjoner. Så for å forbedre asimutoppløsningen for den konvensjonell sideseende radaren, må vi enten redusere bølgelengden til bærefrekvensen, og/eller øke antenne størrelsen. Førstnevnte er begrenset av systemets fysiske størrelse og utforming, og sistnevnte er ingen enkel sak, om vi ikke implementerer syntetisk aperture-dataprosessering i etterkant av at området er belyst.

A.1.1 Forbedret 'across track'-oppløsning, $\Delta x'$, ved hjelp av SAR-prosessering.

Figur 8.3. Sann aperture oppløsning, Δx , er gyldig for små åpningsvinkler, q , og avhengig av avstanden R til bakkesporet. Syntetisk aperture asimut oppløsning, $\Delta x'$, er uavhengig av avstanden, R . Syntetisk aperture asimut oppløsning også kalt 'across track'-oppløsning, $\Delta x'$, er kun avhengig av antennestørrelsen, $D/2$.

En stor antenne-aperture kan syntetiseres ved å flytte den virkelige antennen langs en referanse trajektor. Syntesen gjennomføres ved å kombinere reflekterte ekko og lagre disse samtidig med at man sørger for en kontrollert forflytning langs flysporet. Anta at radarplattformen forflyttes på en rett linje, stykkevis den syntetiske aperturelengden, L , i løpet av belysningstiden, $T = t_{\text{inn}} - t_{\text{ut}} = L/v$, hvor t_{inn} er tidspunktet hvor målet blir belyst av den virkelige strålebredden og t_{ut} , tidspunktet hvor målet ikke lenger belyses av den virkelige aperturestrålebredden, θ . Hvis den syntetiske aperturelengden, L , kan syntetiseres vil den tilsvarende syntetiske strålebredden bli $\theta' = \lambda/2L$, som resulterer i en forbedret asimut-oppløsning gitt ved, $\Delta x = r\theta' = r\lambda/2L = r\lambda / (2r\lambda/L) = L/2$, som i tillegg er avstandsuaavhengig.



Figur 8.4. 'Range'-oppløsning, Δr , er begrenset av tilgjengelig båndbredde for radaren og forbedres ved hjelp av chirp-pulser og kompresjon. (Chirp~ kvitring).

A.1.2 Forbedret 'range'- oppløsning, Δr , ved hjelp av pulset frekvensmodulasjon(PFM)

La oss anta at radarsystemet transmitterer ved mikrobølgefrequenser, det vil si elektromagnetiske pulser med varighet, t . Svært korte pulsvarigheter, ($t \sim 10^{-8}$ til 10^{-7} sekund), kreves for å oppnå en oppløsning på noen meter. Sensor 'range'-oppløsningen, Δr , vist i Figur 8.4, sier hvor nært to punktspredere kan være og likevel skilles. Beregner 'range'-oppløsningen til å være $\Delta r = c t / 2$, der c er lyshastigheten, og hvor faktor 2 tilsvarer tur-returpulsavstanden. Vi kan også skrive $\Delta r \sim c / 2 \Delta f$ hvor $\Delta f \sim 1 / t$ er tilnærmet båndbredden til pulsen.

Forbedring av oppløsning krever reduksjon av puls bredden t , og høy maksimal effekt for å oppnå akseptabel gjennomsnitteffekt. En måte å omgå denne begrensningen er å substituere de korte pulsene med modulerte lange bølgeformer. Forutsetningen er at de prosesseres i etterkant, noe vi kaller pulskompresjon. Mer om pulset frekvensmodulasjon og 'range'-oppløsning i boken referert ved (49).

Chirp-pulsen er en populær pulsform, og er betegnelse på utsendt bølgeform som gjør at man er i stand til å sende ut mye energi.

A.1.3 LynxSAR parametere

Spesifikasjon	Nominelle verdier
Frekvens:	Ku-bånd, 15.2 - 18.2 GHz.
Båndbredde:	1 GHz som maksimalt kan gi 15 cm nominell rangeoppløsningscelle.
Effekt:	350 W .
Oppløsning:	0.3-3 meter celleoppløsning ved SAR-prosessesering i 'stripmap'-modus , 0.1 -3 meter celleoppløsning ved SAR-prosessering i 'spotlight'-modus.
Rekkevidde:	7-30 km avstand i 'stripmap'-modus og 4-25 km 'spotlight'-modus.
Sporbredde:	2600 piksel (934 m ved 0.3 m oppløsning, 45°
Squintvinkel (sidsende skrå vinkel):	+/- 45° - 135°
GMTI: Ground Moving Target Indication	3 m/s (ved 35 m/s), 4-25 km, 10 dBsm mål, -10 dBsm/m ² clutter, 10 km sporbredde.
CCD: Coherent Change Detection	Forandringsdeteksjon er mest effektiv ved beste celleoppløsning. ('spotlight'-modus)

Tabell 8.i. LynxSAR parametere.

A.2 Radar bånd

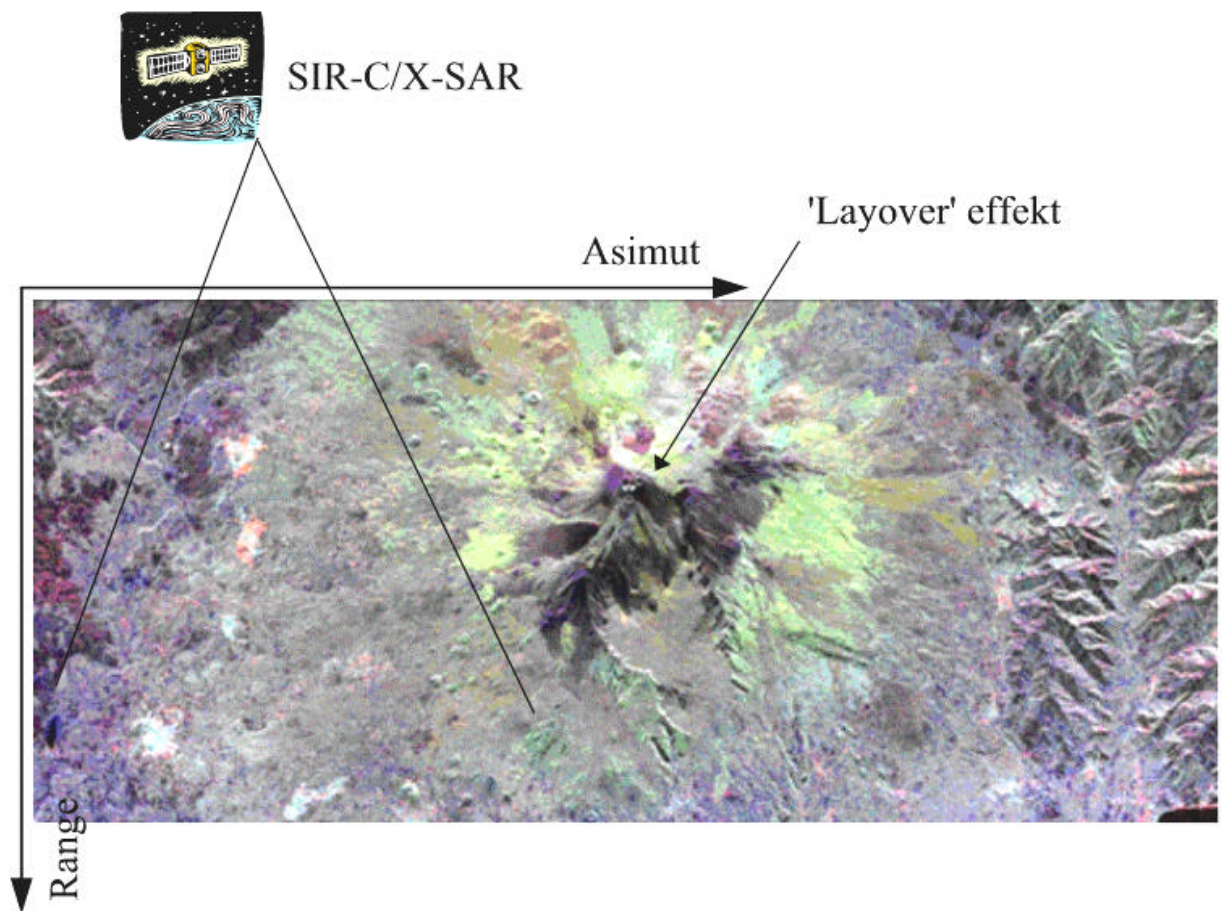
Bånd	Frekvens (GHz)	Bølgelengde	Egenskaper	Anvendelser
P	<1	>30 cm	God penetrasjon	Skog- og terrengmodeller
L	1-2	15-30 cm	Lang rekkevidde	Tidlig-varsling
S	2-4	7.5-15 cm		Flytrafikk kontroll
C	4-8	3.75-7.5 cm		Radar
X	8-12	2.5-3.75 cm	Billige komponenter	Radar
Ku	12-18	1.7-2.5 cm	Liten antenne	Lynx SAR radar
K	18-27	1.1-1.7 cm		Fartsmåling/politi
Ka	27-40	0.75-1.1 cm		Anti-kollisjon for biler
V	40-75	4-7.5 millimeter	Stor båndbredde	
W	75-110	2.7-4 millimeter	Kort rekkevidde	
m m W	110-300	1-2.7 millimeter	Dyre komponenter	

Tabell 8.ii. Definerte radarbånd med tilhørende frekvenser, bølgelengder, egenskaper og anvendelser.

A.3 Geometrisk fortegnings i SAR bilder

Innholdet og illustrasjoner i kapitlet nedenfor baserer seg på (61), og oppgaver i forbindelse med (63).

I mange analyser (som geologiske studier og land ressurs analyser), er SAR-avbildning begrenset av ulike former for geometriske fortegnings. Blant disse regnes ulike typer perspektiv forkortelser ('foreshortening') og ('layover') effekter som gir uønsket skygge og belysning i områder av radarbildet. I tillegg kommer de-fokuseringseffekter, null-refleksjonseffekter, flerveis belysning og -refleksjon ('multipath'), 'salt- og pepper' dryss i områder av radar bildet (det vil si konstruktiv og destruktiv faseinterferens med fellesbetegnelse 'speckle'), og kardinaeffekter, (dvs. kardinalpunkter i radarbildet som på et kompass som følge av sammenfall mellom spredere/reflektorer og bølgeformens fase, inkludert 'Bragg scattering'-fenomener).

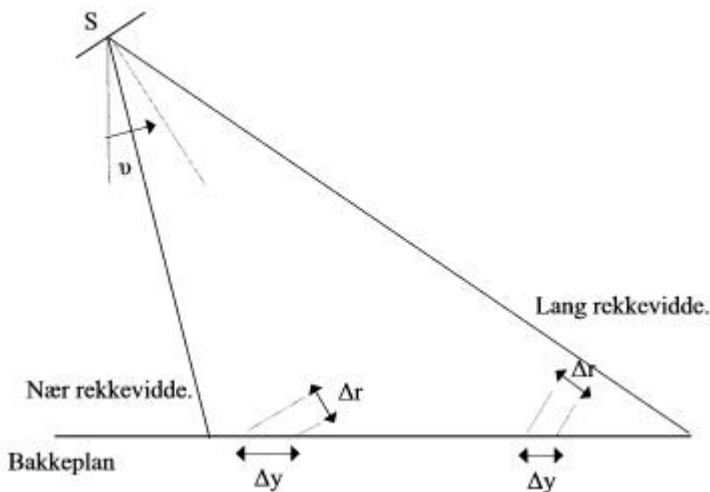


Figur 8.5 SAR-bilde av vulkanen Etna på Sicilia, Italia, som er en av verdens mest aktive vulkaner. Bildet er tatt 11 oktober 1994 med Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) fra romfergen Endeavour. Siste og mest aktive periode i forkant av kampanjen, var i 1991-1993. Bildet er sentrert 37.8 grader nordlig breddegrad og 15.1 østlig breddegrad og dekker et område på 51.2 kilometer ganger 22.6 kilometer.

I Figur 8.5 er lavastrømmer med ulik alder og overflateruhet farget i purpur, grønt, gult og rosa. Det er flere aktive små kratere i bildet, og SAR-bildefortegninger som følge av 'layover'-effekter, sees som sterkt belyste områder i bildet.

La oss ta utgangspunkt i SAR-geometrien nedenfor i Figur 8.6 som viser bakkeplanet ortogonalt på asimut retningen og hvor asimut retningen peker inn i papirplanet. Antar at det belyste området er plant. I tillegg til skrå avstand (slant range) er bakke avstanden (ground range) angitt ved den horisontale linjen.

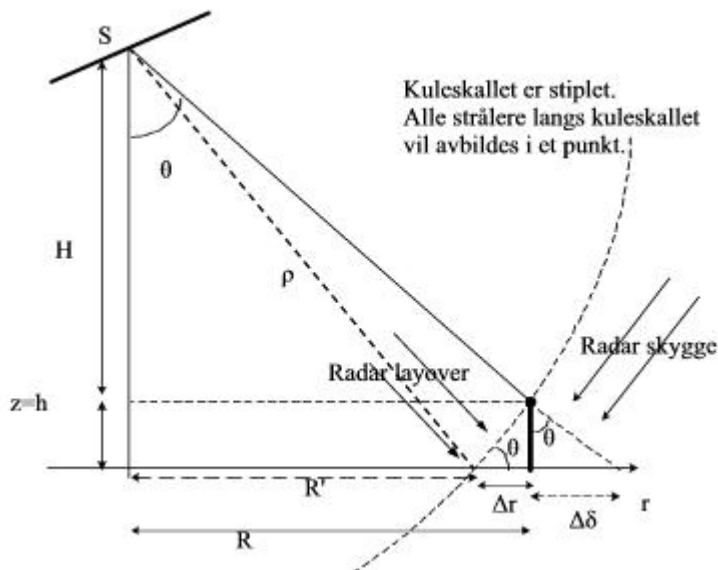
Det er opplagt at den konstante oppløsningen, Δr , i skrå avstanden ikke tilsvarer en konstant oppløsning, Δy , i bakke planet. Spesielt for geometrien nedenfor har vi sammenhengen $\Delta y = \Delta r / \sin \mathbf{n}$, hvor variasjonen i belysningsvinkelen, v , leder til reduksjon i bakke oppløsningen Δy . Disse resultatene påvirker også piksel størrelsen i SAR-avbildningen.



Figur 8.6. Bakkeoppløsningen er gitt ved, $\Delta y = \Delta r / \sin \mathbf{n}$. Variasjonen i belysningsvinkelen, \mathbf{n} , leder til reduksjon i bakke oppløsningen, Δy , ved lang rekkevidde.

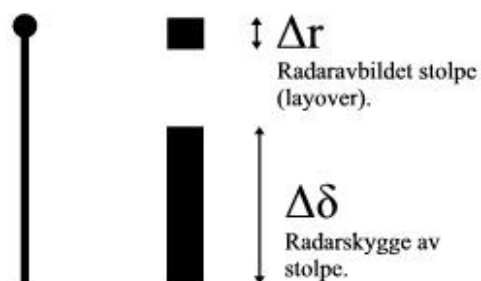
A.3.1 Avbildning av en vertikal stolpe ved hjelp av en sideseenderadar (SAR)

Figur 8.7 viser en radarantenne, S , som observerer en vertikal stolpe med høyde, h . Antennen er flybåren (UAV). Flyet beveger seg inn i papirplanet. Radaren belyser skrått ned på stolpen. R' er den tilsynelatende bakkeavstanden til toppen av stolpen (slik den fremstår for radaren), dersom vi antar at bakken er et plan i $z=0$. Skyggesonen fra stolpen langs bakken kan uttrykkes i høyden, h , som $\Delta\delta = h * \tan \theta$ og $\Delta r = h / \tan \theta$. Vi har skaffet oss et uttrykk for stolpens radarskygge, ($\Delta\delta$), og et uttrykk for stolpens radaravbildning, (Δr , også kalt 'layover').



Figur 8.7. Viser en radarantenne, S , som observerer en vertikal stolpe med høyde, $z=h$. Antennen er flybåren av en UAV. UAV'en beveger seg inn i papirplanet. Radaren belyser skrått ned på stolpen.

Nedenfor i Figur 8.8 (venstre side), skisseres radarbildet av stolpen dersom vi antar at alle delene av stolpen reflekterer like kraftig. Dette er en lite sannsynlig antagelse da en homogen stolpe belyst fra flybåren radar vil gi maks refleksjon i toppen. Avbildningen vil være et punkt (selve stolpen) og en strek (skyggen av stolpen).



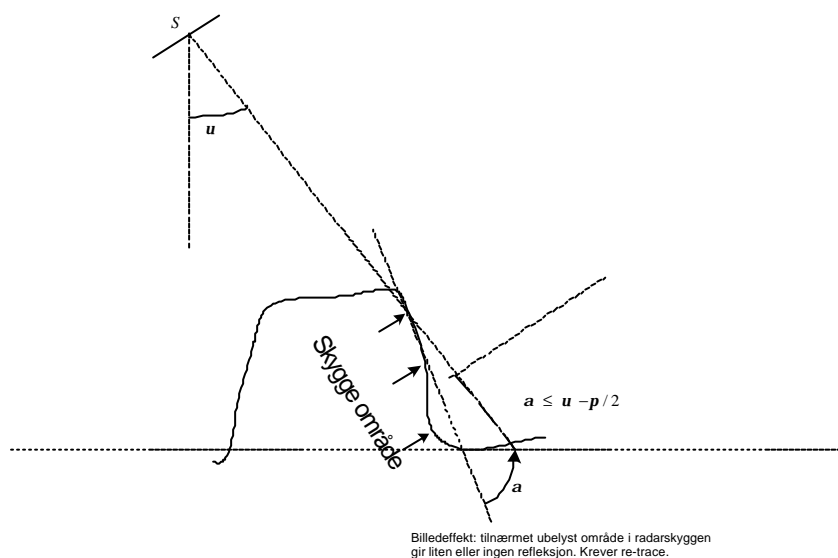
Figur 8.8. Radarbildet av stolpen.

Figur 8.8 (høyre side), viser radaravbildning av en stolpe. Punktavbildningen skyldes at alle strålere langs et kuleskall vil avbildes i ett punkt. Skyggen gir verdifull informasjon til avbildningen av stolpen. Med skygge menes, $\Delta\delta = h \cdot \tan\theta$ hvor h, er høyden til stolpen og θ , skråvinkelen. Radarbildet av stolpen er $\Delta r = h / \tan\theta$.

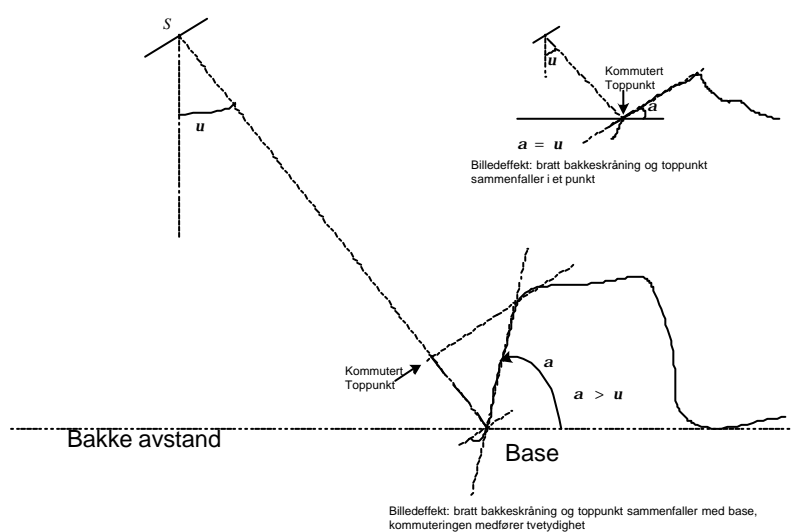
A.3.2 Avbildning av fjordarm ved hjelp av en sideseende radar (SAR)

Hvordan bør vi fly for å avbilde overflaten til en bratt fjord på vestlandet med SAR?

Fjordlandskap avbildet fra flybåren radar er vist i Figur 8.9 og Figur 8.10. Kombinasjonen av 'layover' og skygge kan hindre radaren å se fjorden fra skrå vinkel. Vi minimaliserer overlay ved å fly 90° -grader på fjorden. Kompromiss mellom skygge og overlay er å fly 45° -grader på fjordarmen. Skygge og 'layover' kan hindre eller fortegne radaravbildningen.



Figur 8.9. Viser en flybåren radar som flyr parallelt med fjordarm. Ugunstig, da det ubelyste området i radarskyggen gir liten eller ingen refleksjon. Krever ny overflygning.



Figur 8.10. Viser en flybåren radar som flyr parallelt med fjordarm. Ugunstig, da det belyste området kommuterer og fortegner avbildningen. ('layover' effekt).

A.4 Billedutsnitt, blenderverdier og lysstyrke

Brennvidde eller fokallengde er oppgitt i millimeter. Det hadde blitt mer forståelig om kamerafabrikantene hadde gått over til å angi fotograferingsvinkel. Det er lettere å se for seg vinkler som f.eks 70 og 45 grader. I stedet brukes millimeter brennvidde. Men fordi tallet står i forhold til bildestørrelsen inne i kameraet, sier verdien i seg selv ingen verdens ting før man vet filmformatet (24 x 36 millimeter) eller brikkestørrelsen (9,2 x 9,2 millimeter). Nedenfor følger basislinseformelen og beregning av billedutsnitt.

A.4.1 Beregning av billedutsnitt og synsfelt

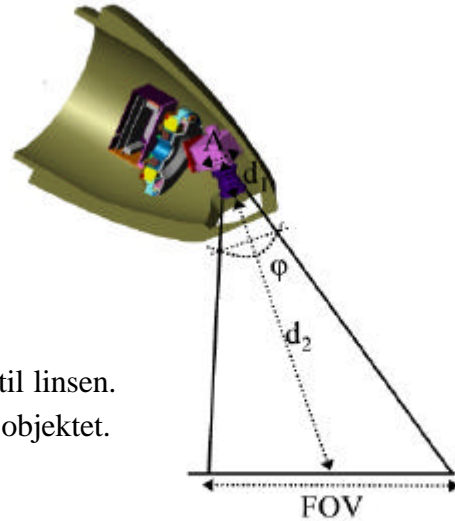
Basislinseformelen er:

$$1/f = 1/d_1 + 1/d_2 \quad (\text{likning 1})$$

f = fokallengden til linsen (f.eks 50 millimeter).

d_1 = avstanden fra detektorplanet til brennpunktet til linsen.

d_2 = avstanden fra brennpunktet til linsen og ut til objektet.



Figur 8.11. Billedutsnittet, FOV, er gitt ved uttrykket, $d_2 / f = FOV/A$ hvor A er diagonalen over bildeelementet, f er fokallengden til objektivet, og d_2 er arbeidslengden til objektet som avbildes. Synsvinkelen, j , er gitt ved uttrykket, $j = 2 * \arctan(A/2f)$.

Brennpunktet er vanligvis på innsiden av linseglasset i objektivet, men i en telefotolinse er den i forkant av linsen. Hvordan beregnes billedutsnittet, FOV?

Siden linsen antas å operere med liten blenderåpning sammenlignet med linsediameteren, kan billedutsnittet beregnes etter formelen:

$$d_2 / d_1 = FOV / A, \text{ der } A \text{ er bildeelementavstanden.} \quad (\text{likning 2})$$

(Kan beregne horisontalt-, vertikalt- eller diagonalt billedutsnitt avhengig av om A er bredden, høyden eller diagonalen til bildeelementet.)

Kombinerer likning (1) og (2) og får

$$1/f = (1/d_2 * d_2 / d_1) + 1/d_2 = 1/d_2 (1 + FOV/A) \quad (\text{likning 3})$$

Med likning (3) kan vi beregne billedutsnitt (FOA) og arbeidsdistansen (d_2) til objektet. For lange arbeidsavstander blir uttrykket i (3) forenklet til:

$$d_2 / f = FOV/A \quad \text{da } FOV/A \gg 1 \quad (\text{likning 4})$$

eller skrevet på formen

$$\underline{FOV/d_2 = A/f = 2 \tan(j/2)} \quad \text{hvor } j \text{ er synsvinkel. (likning 5)}$$

A.4.2 Dimensjoneringseksempel for UAV- EO høyhastighetssensor

Symbol	Formel	Verdi	Forklarende tekst
a, b=		9,2mm	Sensorens horisontale og vertikale sider.
f=		25mm	Oppgitt fokallengde.
f#=		2,0	Oppgitt lystall eller f-nummer.
d ₂ =		300m	Oppgitt avstand til objektet.
D=	f/ f#	25mm/2,0	Beregnet linsediameter.
A=	$(a^2 + b^2)^{1/2}$	13mm	Beregnet sensordiagonal.
FOV=	$A*d_2/f$	160m	Beregnet diagonalt billedutsnitt i objektplanet.
φ=	$2*\arctan(A/2f)$	30°	Beregnet synsvinkel.

Tabell 8.iii. Symboler, formelverk, tallverdier og forklarende tekst til dimensjoneringseksempel for UAV-EO høyhastighetssensor.

Vi ønsker å beregne billedutsnitt og synsvinkel for et kamera med moderat vidvinkeloptikk.

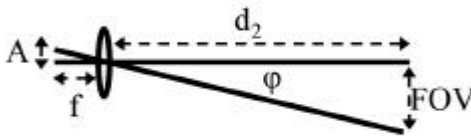
Kodak ES 1.0 har piksel størrelse $9 \times 9 \mu\text{m}$ og $1024\text{H} \times 1024\text{V}$ piksler. Bildeelementet er kvadratisk slik at $a=b=9\mu\text{m}/\text{piksel} * 1024\text{piksel} = 9,2$ millimeter. Beregner sensordiagonalen, $A = (9,2^2 + 9,2^2)^{1/2} = 13$ millimeter.

Fokallengden, f, er oppgitt til 25 millimeter for objektivet som ønskes benyttet.

Synsvinkelen, $\phi = 2 * \arctan(A/2f) = 2 * \arctan(13/2 * 25) \approx \underline{2 * 15 \text{ grader}}$.

Diagonalt billedutsnitt i objektplanet,

$l = h * 2 \tan(\phi/2) = 300 \text{ meter} * 2 * \tan(2 * 15^\circ/2) \approx \underline{160 \text{ m}}$.



Figur 8.12. Synsvinkelen, ϕ , er gitt ved uttrykket, $\phi = 2 * \arctan(A/2f)$, og $FOV = d_2 * A/f$ hvor A er diagonalen over bildeelementet, f er fokallengden til objektivet, og d_2 er arbeidslengden til objektet som avbildes.

I spesifikasjonene for et objektiv angis brennvidde og 'lysstyrke', dvs. evnen til å slippe gjennom lys.

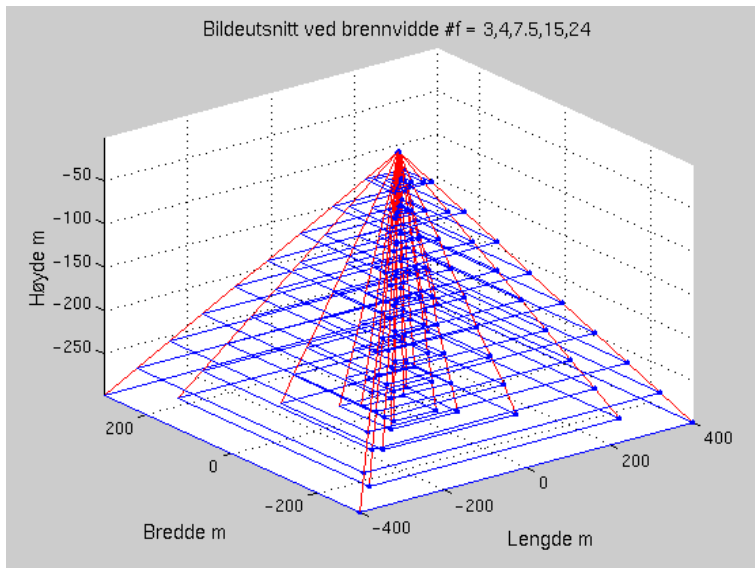
Lysstyrken angis i form av en brøk, f.eks 1:2,8 eller som f-nummer #2,8. Jo høyere tall, jo mindre lys slipper objektivet gjennom. 1:2,8 er vanlig lysstyrke på objektiver i enkle digitale kameraer. Zoomobjektiver har ofte variabel lyststyrke. Lysstyrken synker i takt med at du zoomer inn motivet. Vanlig lysstyrke på zoom-objektiver er mellom 1:2,8 og 1:4,5. Et objektiv med høy lysstyrke gjør at du kan fotografere i svakere lys. Objektivets lysstyrke, eller største blenderåpning, viser hvor mye lys som kan slippe gjennom.

Hvis vi setter blender 2,0 som et utgangspunkt, vil en sammenligning se slik ut:

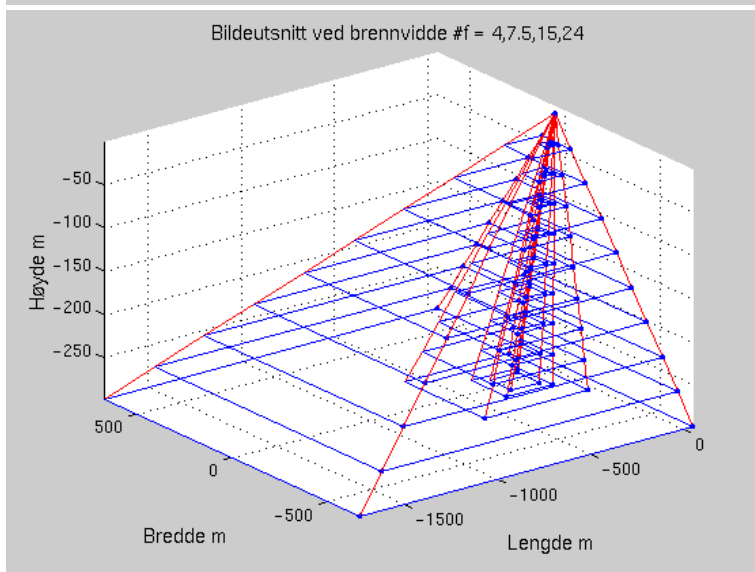
Blender:	Lysgjennomgang:
1:2,0	100%
1:2,8	50%
1:3,5	33%
1:4,0	25%
1:4,5	17%
1:5,6	12,5%

Tabell 8.iv. Blender og lysgjennomgang for et objektiv.

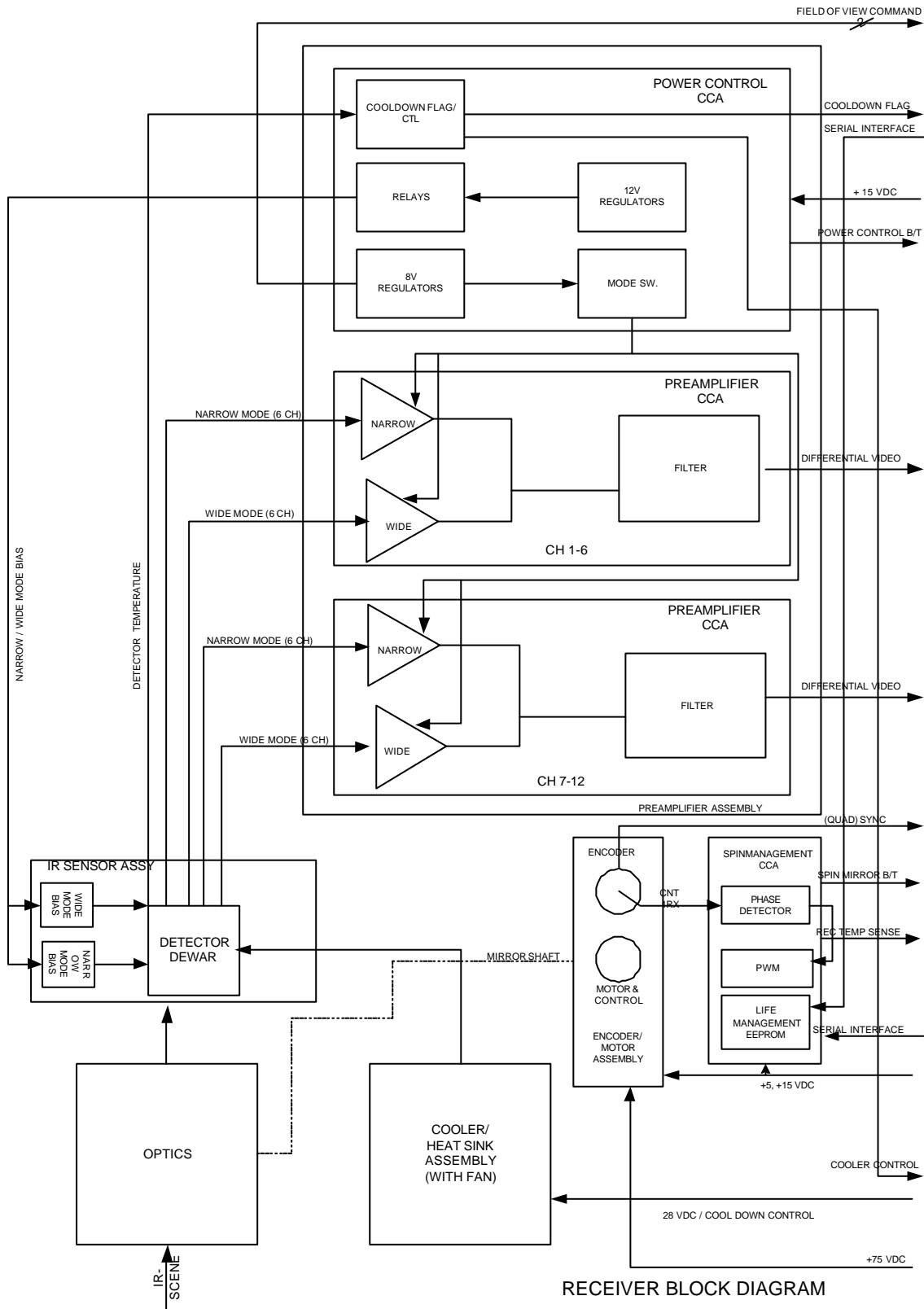
Når du fotograferer i svakt lys brukes stor blenderåpning, og da er skarphetsområdet redusert. Det vil i praksis si at bildet blir mer uskarpt både foran og bak den avstanden kameraet innstiller seg på. Kan du velge blenderåpning manuelt, så kan du selv bestemme dybdeskarphetsområdet til bildet, ifølge tekstutdraget fra (29) og formelverket fra (30). Figur 8.13 og Figur 8.14 viser beregnet billedutsnitt som funksjon av fastoptikk med varierende fokallengde (brennvidde).



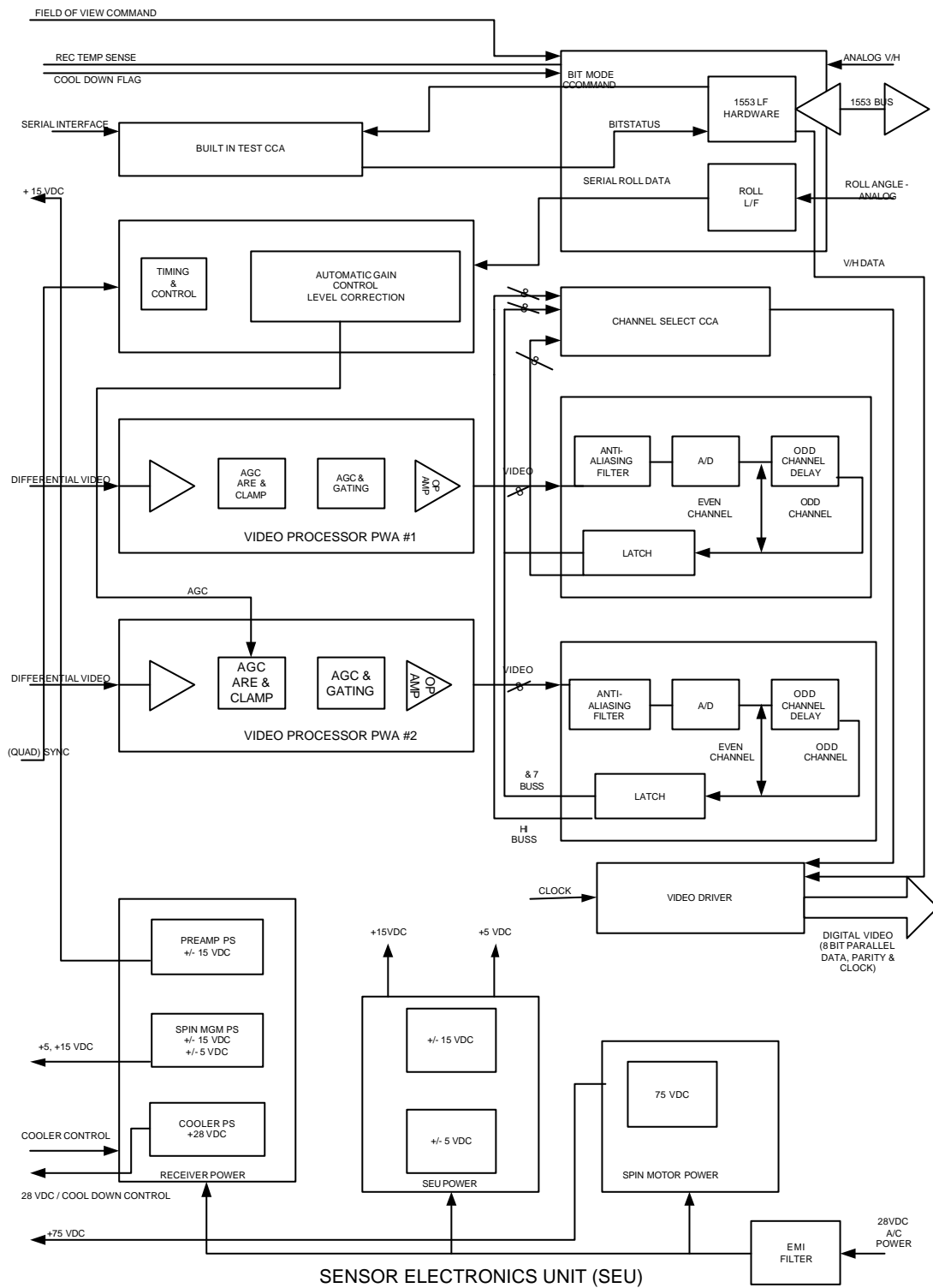
Figur 8.13. Beregnet billedutsnitt for nedoverseende kamera med fastoptikk og ulike brennvidder (3 til 24 millimeter). Kameraet har $\frac{1}{2}$ " CCD, dvs. sensorareal tilsvarende 6.4x4.8mm. Høydemålet er negativt som følge av at origo er plassert i sensoren.



Figur 8.14. Beregnet billedutsnitt for framoverseende kamera med fastoptikk og ulike brennvidder (4 til 24 millimeter). Kameraet har $\frac{1}{4}$ " CCD, dvs. sensorareal tilsvarende 3.2x2.4mm. Høydemålet er negativt som følge av at origo er plassert i sensoren.



Figur 8.15 Skisse (side 1/2) signalbehandling- og kontrollelektronikk blokkdiagram for et typisk IRLS design (ATARS, år 1996), ref. (61).



Figur 8.16. Skisse (side 2/2) sensor- og signalkondisjoneringselektronikk blokkdiagram for et typisk IRLS design (ATARS, år 1996), ref. (61).

A.5 Hvem bruker, eller vil bruke, hva slags type nyttelast på hvilken UAV?

Figure XIV - WHO USES, OR WILL USE, WHAT PAYLOAD ON WHAT UAV ?					
DEPLOYING COUNTRY	UAV SYSTEM	UAV SYSTEM MANUFACTURER	PAYLOAD DESIGNAT.	TYPE OF SENSOR(S)	PAYLOAD MANUFACTURERS
Algeria	Seeker II	Kentron, South Africa	Goshawk	EO/IR 2nd gen	Cumulus, South Africa
Belgium	Epervier Hunter	MBLE Défense †, Belgium IAI, Israel & Eagle consort.	AA3-70/8-62 MOSP ?	EO still camera EO/IR	Omera/Thomson, France IAI-Tamam, Israel
Bahrain	Exdrone	BAI Aerosystems, USA	PTZ	EO & EO/IR	BAI Aerosystems, USA
Bulgaria	Vigilant	Techno-Sud Ind., France	unnamed	EO	Techno-Sud Ind., France
Czech Rep.	Sojka III	VTUL a PVC, Czech Rep.	Camella	IR linescanner	Intertechnique, France
Denmark	Sperwer	Sagem, France	Hesls	EO/IR	Sagem, France
Finland	Ranger	Oerlikon-Contraves, Switzerl.	MOSP	EO/IR	IAI-Tamam, Israel
France	CL289 Crecerelle Fox MLCS Hunter Vigilant	Aérospatiale/Dornier Sagem, France CAC Systèmes IAI, Israel & TRW, USA Thomson & Techno-Sud Ind.	KRb8/24D, or Corsaire Sword unnamed Cyclope 2000 unnamed - 445G MK III - Camella - GlobalScan Mosp 3000 - unnamed - Sophie	EO, or IR linescan SAR/MTI CCD linescanner IR linescanner static CCD (pilot) EO/IR IR linescanner HD EO linescanner EO/IR - CCD - IR	Zeiss, Germany Sagem (SAT), France Thomson/F & Dornier/D SAT, Sagem SAT, France SAT, France Inframetrics, USA Intertechnique, France Cose, France IAI-Tamam, Israel Techno-Sud Ind., France Thomson-CSF, France
Germany	CL289 Tallfun Brevet (KZO) LUNA	Dornier & Aérospatiale STN Atlas STN Atlas & Matra EMT, Germany	KRb8/24D, or Corsaire upgrade Tallfun Isos 2000 P286D Attica	EO, or IR linescan SAR/MTI Imaging radar IR IR + EO	Zeiss, Germany Sagem (SAT), France Dornier/Thomson Daimler-Benz, Germany Zeiss, Germany Zeiss, Germany
India	Nishant Searcher	ADE, Bangalore, India IAI, Israel	? Mosp	EO or IR EO & IR	local production IAI-Tamam, Israel
Indonesia	Fox AT2 Hellot	CAC Systèmes, France	- GlobalScan - Camella - 445G MK II	- HD EO linescanner - IR linescanner - EO/IR	Cose, France Intertechnique, France Inframetrics, USA
Israel	Scout Searcher Hermes 450S	IAI, Israel IAI, Israel Silver Arrow, Israel	various various MOSP	various various EO/IR	Controp, Israel IAI-Tamam, Israel IAI-Tamam, Israel
Italy	Mirach 20 Mirach 26 Mirach 150	Meteor, Italy Meteor, Italy Meteor, Italy	? ? ?	CCD or IR CCD/LLLCCD/IR CCD/IRLS/Panoramic or High Alt. Camera	AquaTV or Galileo, Italy FIAR/Rank-Pullin/Galileo FIAR, Italy/BAe, UK/Vinten or Vinten/UK
Netherlands	Sperwer LUNA	Sagem, France EMT, Germany	Hesls P286D Attica	EO/IR or EO IR + EO	Sagem, France Zeiss, Germany
Romania	Shadow 600 Vigilant	AAI, USA Techno-Sud Ind., France	445G MK II unnamed	EO/IR EO	Inframetrics, USA Techno-Sud Ind., France
Singapore	Scout Searcher	IAI, Israel IAI, Israel	various various	various various	Controp & Tamam, Israel Controp & Tamam, Israel
South Africa	Seeker Vulture	Kentron, South Africa ATE, South Africa	Goshawk ODS	EO/IR 1st gen EO	Cumulus, South Africa ATE & M-Tek, S. Africa
South Korea	Bijo Harpy Searcher	Daewoo IAI, Israel IAI, Israel	undecided ? MOSP	EO/IR radar seeker EO/IR	undecided ? Israel IAI-Tamam, Israel
Spain	Siva	INTA, Spain	MKD 400NDP	EO/IR	Tadiran, Israel
Sri Lanka	Scout	IAI, Israel	various ?	various ?	Controp or IAI, Israel
Sweden	Back-Pack Ugglan	Mission Technologies, USA Sagem, France	? unnamed	? EO/IR	? Sagem, France
Switzerland	Ranger	Oerlikon-Contraves, Switzerl.	MOSP	EO, IR, EO/IR	IAI-Tamam, Israel
Thailand	Searcher	IAI, Israel	MOSP	EO, IR	IAI-Tamam, Israel
Turkey	Gnat 750	General Atomics, USA	Model 12	EO or IR	Wescam, Canada
UAE (Abu Dhabi)	Seeker	Kentron, South Africa	Goshawk	EO/IR	Kentron, South Africa
UK	Phoenix	GEC Marconi Avionics, UK	MRT-S	IR	GEC Marconi Avionics
USA	Camcopter Darkstar Dragon Global Hawk Gnat 750 Hunter Outrider Pioneer Pointer Predator	Schiebel, Austria Lockheed & Boeing, USA BAI Aerosystems, USA Teledyne Ryan, USA General Atomics, USA TRW, USA & IAI, Israel Alliant Techsystems, USA Pioneer UAV, Inc/AAI Corp. Aerovironment, USA General Atomics, USA	445G MK III Tesar & CA-236 PTZ Hisar & unnamed 12DL Mosp Ultra 3000 or Pop 100 12DS ? - IRuCam Tesar & Skyball	EO/IR SAR EO linescanner EO SAR/MTI EO/IR EO & IR EO/IR EO/IR EO/IR EO IR SAR/MTI 2xE0/IR	Inframetrics, USA Northrop, USA Recon/Optical, USA BAI Aerosystems, USA Hughes, USA Hughes, USA Wescam, Canada IAI-Tamam, Israel FLIR systems, USA IAI-Tamam, Israel Versatron, USA ? Microcam Corp., USA Northrop, USA Versatron, USA

Figur 8.17. Oversikt (1999) hentet fra 'Development and operation of UAV's for mil. and civil applications. Lecture 1:RTO_EN_009 Imaging'. //ftp.rto.nato.int.

Litteratur

- (1) Ingemar Renhorn (2002): Forskningssjef FOI ved institutt for IR-systemer, *framsyn*. Bak hver linse finnes en signalbehandler, nr 2, s10.
- (2) Gronvall, Kullander, Steinvall, Lindgren, Klasen og Sjoqvist (2002): Laser i sentrum, *framsyn*, nr 2, s18.
- (3) Jahne, Haussecker, Geissler (1999): Handbook of computer vision and applications. Vol 1, Academic Press, Heidelberg.
- (4) Øivind S Wenstøp (2001): IR Kamera - Teknologi og utviklingstrekk, FFI/Notat-99/051110, ugradert
- (5) Dr. A. Hinz, Otto Zenke Z/I Imaging D-73442 Oberkochen (): Briefing, Oslo 02-2002
- (6) Dr. Alexander Hinz, Otto Zenke Z/I Imaging (2002): Presentasjon: Konsept for digital rekognosering. Fremtidig oppgradering av KRb 8/24 EO sensorlast for CL289, FFI, 19-03-02.
- (7) Øivind Aase, Rune Bratlie Fjellanger Widerø (2002): Test av digitale kameraer - invitasjon til å delta i fullskala uttesting av digitale bildedannende sensorer., *Prospekt 1*, s7-9.
- (8) Eivind Strømman (2001): (U) Tolkning av UAV-bilder i KFOR(5), reiserapport-2001/03938, begrenset
- (9) Gert Kromhout (2001): TARS-Manned Tactical Recce is back, *Miltech*, 6, s62.
- (10) Craig Hoyle, Jane's Defence Weeklys aviation editor, based in London (july 2002): Reconnaissance - The information war in the air, *Jane's Defence Weekly* **38**, 4, s70.
- (11) Eivind Strømman (1999): Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance Conference London 1-2 mars 1999, FFI/REISERAPPORT-99/01696, Begrenset
- (12) Lars Ulander (2002): Forskningssjef FOI, spaningsradar, *Framsyn* , 2, s16-17. Ingen steder å gjemme seg. Radarparet som ikke engang gjør skogen sikker
- (13) Franceshetti G. og Lanari R. (1999): Synthetic Aperture Radar Processing, CRC Press LLC, , Florida USA.
- (14) E.J. Schweicher (OMRA) (1999): Various sensors aboard UAVs., RTO-AVT/VKI Special Course ,Development and operation of UAVs for military and civil applications, Bryssel, 13-17 sept .
- (15) Randi Haakenaasen (02): Forskning på materialer/teknologi for deteksjon av infrarød stråling - arbeid i EPITEK laboratoriet ved FFI., Foredrag ,Omvisning EPITEK, FFI, 25-02.
- (16) E.L Fleeman. Sensor alternatives for future Unmanned Tactical Aircraft (UTA), AGARD CP 594 System Design Considerations for Unmanned Tactical Aircraft. 7-9 oktober 1997 Athen, Hellas

- (17) D. Long (1980): Optical and infrared detectors (Eds R.J Keyes), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, s 102.
- (18) Dyke Weatherington (head of US DoD UAV Planning Task Force) til Mark Hewish, Jane's international reporter (2002): UAV PAYLOADS. Unmanned, unblinking, undeterred., *Jane's international defense review* **vol 35**, no 9, s47.
- (19) Mark Hewish (2002): UAV PAYLOADS, *Jane's IDR* **vol 35**, no 9, s 48.
- (20) Rune Sundgot (2001): Principles of modern RADAR, FFI Reiserapport - 2001/06054FFIE/805/113, Atlanta, 29 okt -2 nov .
- (21) RHEENEN Arthur D van (2000): DEVICE RESEARCH CONFERENCE AND ELECTRONIC MATERIALS CONFERENCE, FFI Reiserapport ,- 2001/03991FFIE/809/176, NOTRE DAME, UNIVERSITY, SOUTH BEND, INDIANA, USA , 7 august 2000.
- (22) Tore Smestad, Hans Øhra (2002): FFI-Kompetanse for geolokalisering av bakkeradarer fra fly, FFI/NOTAT-2002/03318, Begrenset
- (23) Rune Stensrud (2002): Stabilisert kameraplattform for lavhastighets-UAV, FFI/NOTAT/2002/04313.
- (24) Donald Wehner (1995): High Resolution Radar, Artech House.
- (25) Erling Malvin Sunde (2002): Deteksjon av optisk og infrarød stråling., Kompendium ,UNIKF351 , Kjeller, vårsemesteret.
- (26) Williams & Becklund (1972): OPTICS: A Short Course for Engineers & Scientists (Eds Stanley S. Ballard University of Florida), Wiley-Interscience, US, s98-s113.
- (27) Wescam sales management (2001): Model 16 Dual Sensor and TUAV presentation, Powerpoint ,Salgspresentasjon tilrettelagt av Hovet & Co , FLO Luft, Kjeller, Høst.
- (28) W. Mclracken (1993): Passive electro optical systems, volume 5. (Eds J. Accetta, D.L Schumaker), SPIE Optical Eng. Press, Washington, s23-s97.
- (29) Knut Før Sund (1999): Digital fotografering på jobben, Knut Før Sund Informasjon, Marieroveien 33, 1390 Vollen, s19-s21.
- (30) www.vision1.com (printout 2/7/2000): Figuring Field of View Mathematically.
- (31) Raymond Silva, William Shaw and Kurt Nordhaus (1996): An Infrared Scanner That Digitally Corrects For Bow-tie Distortion, *SPIE applied optics* **vol. 2744**, nr. 0-8194-2125-1, s237-253.
- (32) Alain Manissadjian, Philippe Tribolet, Philippe Chorier, Patricia Costa (30/7-4/8/2000): Sofradir infrared detector products: the past and the future, *SPIE San Diego Aug 2000*, 1-16s.
- (33) Hoelsæter, Øistein T. (1997): En oversikt over eksisterende og framtidige UAV'er, FFI/NOTAT/-97/00094, Ugradert

- (34) Vegard Arneson (2002): Spredning av informasjon fra UAV-sensorer, FFI/RAPPORT/-2002/03639, Ugradert.
- (35) Øistein Hoelsæter, Per Espen Hagen (2002): Navigasjonssystem for NSM-basert UAV, FFI/N-2002/03342, Begrenset
- (36) Morten Østbø (2002): UAV bakkesegment, FFI/NOTAT/-2002/03905, Ugradert.
- (37) Johnny Njåstad (2001): En analyse av frisikt luft-til-bakke og luft-til-luft, FFI/N-2001/01840, Ugradert
- (38) Sigbjørn Aune (2000): Observasjonsevnen til en lavtflygende UAV, FFI/R-2000/02212, Begrenset
- (39) Eivind Strømman (2001): Air Surveillance and Reconnaissance Conference. London 15-16 mars 01., FFI/RR-2001/02174, Ubegrenset
- (40) Strømman Eivind (2001): Tolking av UAV-bilder i KFOR(5)., FFI/RR-2001/03938, Begrenset
- (41) Sigbjørn Aune (2001): Observation Ability for a Low Altitude UAV. , Paper ,Proceedings of UAVs 16th International Conference Bristol 2001, Bristol, UK.
- (42) Johnny Njåstad (2001): Microwave Datalink for Strike Support UAV, Paper ,RTO/SAS-016.
- (43) Johnny Njåstad (2001): Communications and Datalink Details for Strike Support UAV, Short note for RTO ,RTO/SAS-016.
- (44) Eivind Strømman (2001): UAV og bildetolkning., FFI/R-2001/04282, Konfidensielt
- (45) Nils A Sæthermoen (2002): 739 UAV – analyse og teknologi, FFI/ProsjektluttR-2002/131/3, Konfidensielt
- (46) Jarle Synnevåg (2001): Role for UAVs, short note for RTO/SAS-016
- (47) L.A. Klein (1997): Millimeter-Wave and Infrared Multisensor Design and Signal Processing, ISBN 0-89006-764-3 ,Artech house inc.
- (48) Trygve Sparr (2001): Seminar i avbildende radar. Kompendium ,UNIKFABR , Kjeller, høstsemesteret.
- (49) Carrara, Goodman og Majewski. (1995): Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms, Artech House, Boston, London.
- (50) Torbjørn Skauli (2002): Foredrag, 100ganger bedre fargesyn med Hyperspektral avbildning. FFI Kjeller, 4-10-02.
- (51) Aurora HSI camera (2001): *Jane's IDR* vol **34**, no 9, s 6.
- (52) Nils Anton Sæthermoen (2002): Foredrag, UAV for Norge. FFI Kjeller, 10-10-02.
- (53) Kirsten Kvernsveen (2001): Foredrag, 'Anybody out there? Radar, 'stealth' og lavtflyvende missiler'. FFI Kjeller, 14.12.2001.

- (54) A. Lettington, I.M. Blankson, M. Attia, D. Dunn (2002): Review of imaging architecture [4719-32]. IR and MMW Imaging Systems: Design, Analysis, Modelling and Testing. SPIE Vol. 4719. p327-p340. Orlando, USA, 3-5.4.2002.
- (55) C. Martin, et al. (2002): Real-time wide field of view passive millimetre-wave imaging [4719-33]. IR and MMW Imaging Systems: Design, Analysis, Modelling and Testing. SPIE Vol. 4719. p341-p349. Orlando, USA, 3-5.4.2002.
- (56) M.A. Soel, et al. (2002): High-end infrared imaging sensor evaluation system [4719-31]. InSb vs. QWIP Imaging Sensors: Comparison in Progress. IR and MMW Imaging Systems: Design, Analysis, Modelling and Testing. SPIE Vol. 4719. p75-p93. Orlando, USA, 3-5.4.2002.
- (57) J. Kostrzewa, et al. (2002): Overview of the UL3 Omega uncooled camera and its applications [4719-26]. IR and MMW Imaging Systems: Design, Analysis, Modelling and Testing. SPIE Vol. 4719. p189-p195. Orlando, USA, 3-5.4.2002.
- (58) K. Thompson, et al. (2002): UAV sensor-systems for close-range operations [4719-12]. Sensor technology for the Urban Battlefield. IR and MMW Imaging Systems: Design, Analysis, Modelling and Testing. SPIE Vol. 4719. p124. Orlando, USA, 3-5.4.2002.
- (59) W. Mcracken (1992): IRLS-Basic Design and Future Challenges, SPIE volum 2744, p208-p226.
- (60) G. Pye, et al. (1992): Deploying the Honeywell Scanner Receiver Unit, SPIE volum 2744, p227-p236.
- (61) R. Silva, et al. (1992): An Infrared Line Scanner That Digitally Corrects For Bow-tie Distortions, SPIE volum 2744, p237-p253.
- (62) Nils A Sæthermoen (2000): Langdistansevåpen missil/UAV – Strukturelement i invasjonforsvar, FFI/Rapport-2000/01536, Begrenset.
- (63) J.E. Grobmyer, Jr., et al. (2002): [4719-11]. LADAR MOUT Evaluation (LAME) conducted at the McKenna MOUT site, Fort Benning, Georgia. Sensor technology for the Urban Battlefield. IR and MMW Imaging Systems: Design, Analysis, Modelling and Testing. SPIE Vol. 4719. p113. Orlando, USA, 3-5.4.2002.
- (64) Rune Sundgot (2001): Principles of modern RADAR, MMW Radars for Smart Munitions, J.A Saffold, kursdokumentasjonsvedlegg til FFI Reiserapport - 2001/06054FFIE/805/113, Atlanta, 29 okt -2 nov .
- (65) www.uvonline.com (2002): Shepard's Unmanned Vehicle handbook, payload, p67-p83.

FORDELINGSLISTE

<input checked="" type="checkbox"/> RAPP <input type="checkbox"/> NOTAT <input type="checkbox"/> RR	RAPPORT NR. 2002/04167	REFERANSE FFIE/739/131	RAPPORTENS DATO 22. november 2002
RAPPORTENS BESKYTTELSESGRAD UGRADERT		ANTALL EKS UTSTEDT 40	ANTALL SIDER 65
RAPPORTENS TITTEL SENSORTEKNOLOGI FOR FREMTIDIG UAV		FORFATTER(E) STENSRUD, Rune	
FORDELING GODKJENT AV FORSKNINGSSJEF Stian Løvold		FORDELING GODKJENT AV AVDELINGSSJEF: Johnny Bardal	

EKSTERN FORDELING

INTERN FORDELING

ANTALL	EKS NR	TIL	ANTALL	EKS NR	TIL
1		Oblt Eivind Valestrand/FKS	9		FFI-Bibl
1		KK Ronny Iversen/FO/FST	1		Adm direktør/stabssjef
1		Oblt Bjørn Larsson/FO/FST	1		FFIE
1		Mai Sven H Halvorsen/FO/FST	1		FFISYS
1		OK Per Anders Bakke/FO/SST	1		FFIBM
1		Oblt Rune Bjerkås/FO/LST	1		FFIN
1		Fenr Magne Sagvolden/LKVS	1		Stensrud, Rune, E (forf.)
1		Oblt Erik Enis Dokken/FO/E	5		Restopplag Bibliotek
1		Oblt Sigurd Fongen/LOI			
1		Rittm Stein Berge/HKS			ELEKTRONISK FORDELING:
1		Mai Lars Huse/SSFA			Løvold, Stian, E
1		OK Atle Sommer/KNMT/SMOPS			Sæthermoen, Nils A., E
1		KK Svein Jarle Jacobsen/SJKE			Strømman, Eivind, E
1		Oing Jan Inge Smeland/FLO/Land			Aune, Sigbjørn, E
1		Sjefsing Fredrik Kloumann/KDA			Arneson, Vegard, E
1		Avding Inge Hopen/FLO/Land			Østbø, Morten, E
1		Kpt Egil Strømsvåg/FLO/Luft			Bakstad, Lorns Harald, E
1		Oblt Ole Pettersen/NOBLE			Johansson, Nils Greger, BM
1		KL Rolf Lund/SSTN/Vigdel			Løvbrøtte, Kjetill, E
1		Rittm Olav Jørgensen/SEG/Obn			Hoelsæter, Øistein T, E
					Erstad, Hans Chr, E
					Larsen, Erlend, E
					Skille, Gunnar, E
					Christensen, Øyvind, E
					Helgesen, Helge, E
					Angeltveit, Terje, E
					Brodersen, Emil, E
					Aas, Johan H, E
					Gundersen, Rune, E
					Skauli, Torbjørn, E
					FFI-Veven

FFI-K1

Retningslinjer for fordeling og forsendelse er gitt i Oraklet, Bind I, Bestemmelser om publikasjoner for Forsvarets forskningsinstitutt, pkt 2 og 5. Benytt ny side om nødvendig.